



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU RÖMAN

AVOINPROFIILISEN PORAPAALUSEINÄN KÄYTTÖKOHTEET JA
ASENNETTAVUUS KARKEARAKEISIIN KITKAMAIHIN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara
Tarkastaja ja aihe hyväksytty 2.5.2018

TIIVISTELMÄ

TEEMU RÖMAN: Avoinprofiilisen porapaaluseinän käyttökohteet ja asennettavuus karkearakeisiin kitkamaihin

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 88 sivua, 13 liitesivua

Huhtikuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Infrarakentaminen

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara

Avainsanat: porapaaluseinä, CT-paalu, kaivanto, tukiseinä

Rakentamisen yhteydessä lähes joka kohteessa rakenteet ulottuvat maanpinnan alapuolelle, jolloin tarvitaan kaivantoja. Kaivannot voidaan tehdä luiskaten tai tuennan avulla. Rakentaminen keskittyy jatkuvasti enemmän jo rakennettuun ympäristöön, jolloin luiskaten tehdyille kaivannoille on harvoin tilaa, joten tarvitaan kaivannon tuentaa. Kaivannon tuentaan ei ole olemassa valmista ratkaisua, vaan jokaiseen kohteeseen valitaan parhaiten sopiva vaihtoehto kaivannon syvyyden, maaperäolosuhteiden ja ympäristön perusteella. Tästä syystä kaivannon suunnittelua helpottavat kehittyvät tuentaratkaisut, jotka sopivat erilaisiin olosuhteisiin.

Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli selvittää avoinprofiilisen porapaaluseinän (myöhemmin CT-porapaaluseinän) käyttökelpoisuutta karkearakeisissa kitkamaissa sekä mahdollisia käyttökohteita seinälle. Osatavoitteena oli myös selvittää CT-porapaaluseinän uusiokäyttömahdollisuutta.

Työn alussa tehtiin kirjallisuustutkimus, jossa selvitettiin maanpaineseinän mitoittamisperusteet ja kaivannon toiminnallisen suunnittelun periaatetta. Tämän lisäksi kirjallisuustutkimuksessa vertailtiin eri vaihtoehtoja kaivannon tuennalle. Työn toisessa osassa tehtiin CT-porapaaluseinälle koeasennus, jossa havainnoitiin aiheuttavatko haastavat maaperäolosuhteet ongelmia seinän asennuksessa. Koeasennuksessa kaivettiin seinän taustalle kaivanto, jonka jälkeen mitattiin seinässä maanpaineen vaikutuksesta tapahtuvia siirtymiä. Koetilannetta mallinnettiin laskennallisesti ja verrattiin laskennallisia siirtymiä kokeessa mitattuihin. Koeasennuksen jälkeen paalut nostettiin ylös, ja havainnoitiin mahdollisesti syntyviä ongelmia uusiokäytön näkökulmasta.

Koeasennuksen perusteella ei havaittu ongelmia asennuksessa karkearakeisiin kitkamaihin, eikä kallioon, johon osa paaluista ulottui. Paalujen ylösnostossa havaittiin ongelmia liittyen nostotekniikkaan, joka vaurioitti paaluja. Koeasennuksen mallinnuksessa saadut laskennalliset siirtymät olivat suurempia, kuin mitatut.

Mahdollisista käyttökohteista käsiteltiin käyttämistä väliaikaisena tai pysyvänä tukiseinänä, lämpöä eristävänä seinänä, pilaantuneiden maiden eristysrakenteena, satamarakentamisessa, lopullisena kantavana rakenteena ja suurina liittorakennepaaluina. Näistä kaikki osoittautuivat mahdollisiksi toteuttaa CT-porapaaluseinällä. Jatkotutkimuksissa tulee kuitenkin selvittää paalun mekaanisia sekä toiminnallisia ominaisuuksia suuremmassa mittakaavassa.

ABSTRACT

TEEMU RÖMAN: Applications of open section drilled pile and installability to coarse soils

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 88 pages, 13 Appendix pages

December 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Infrastructural Engineering

Examiner: Professor Tim Lämsivaara

Keywords: drilled pile wall, CT-pile, excavation, retaining wall

During construction, it is common that the structures extend under the ground surface and that requires excavations. Excavations can be either sloped excavations or supported with retaining walls. As constructions are more and more in the area of already built environment, there is no space to do sloped excavations which causes a need to support the excavation with a retaining wall. There is no all-purpose retaining wall so the method in how to support the excavation has to be selected based on the depth of the excavation, the subgrade and the surrounding circumstances. For that reason, it is useful to have a wide range of retaining wall types which are suitable for different circumstances.

The focus of this thesis was to study the installability of the open section drilled pile (later referred to as CT-pile) to coarse soils, and possible applications for the wall. Also the re-usability of the wall was to be studied.

The thesis started with a literary research in which the basics of designing a retaining wall were studied. Both structural and functional design were researched. Also different retaining wall types were compared. A field installation of the CT-pile wall was made in the second part of the thesis. The goal of the field study was to observe if the installation to coarse soil causes problems. After the installation was done, an excavation was made by the wall to measure the displacements of the wall caused by earth pressure. Afterwards, the piles were lifted up from the soil to observe if the lifting causes any problems or would damage the piles.

During the field study, no problems occurred during the installation. During the lifting of the piles, some of them were damaged by the lifting method. A vibrating pile driver was used to lift the piles. The excavation made during the field study, was modelled and the displacements were calculated and compared to the measured displacements. Calculated displacements were larger than the measured ones.

Possible applications studied in the thesis were to use the wall as a temporary or permanent retaining wall, an isolating structure in contaminated soils, in harbor construction, a foundation structure and a large composite structure. All of the mentioned were possible to implement with a CT-pile wall. As following studies of this thesis, the mechanical and functional qualities have to be researched in a larger scale.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Pöyry Finland Oy:lla ja työn tilaajana toimi Robit. Haluan kiittää molempia mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö. Erityiskiitoksen ansaitsee Jouko Lehtonen, joka toimi työn ohjaajana Pöyryllä. Kiitos myös työn tarkastajalle, professori Tim Länsivaaralle. Lisäksi kiitos kaikille työn edistämistä auttaneille kollegoilleni hedelmällisistä keskusteluista.

Diplomityön tekeminen tarjosi lukuisia haasteita, stressaavia pitkiä päiviä sekä paljon uutta oppia. Joidenkin työpäivien jälkeen jaksaminen on ollut koetuksella, mutta työstäväni Alinan jokapäiväisen tuen ansiosta seuraava päivä on kuitenkin aina alkanut hymy huulilla. Kiitos Alinalle tuesta ja jaksamisesta.

Verrattuna päivään, jolloin astelin ensimmäistä kertaa TTY:lle, tänä päivänä valmistumisen koittaessa ulos koulusta astelee paljon muuttunut mies. Tähän suurena vaikuttajana on ollut opiskelijaelämä harjoitustöineen ja tentteineen, mutta ennen kaikkea ystävät, joiden kanssa vuosi toisensa perään on ollut raskaasta puurtamisesta huolimatta enemmän iloa täynnä. Kiitos teille.

Tampereella, 25.4.2018



Teemu Röman

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritustapa	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset.....	2
2.	MAANPAINESEINIEN MITOITTAMINEN JA TOIMINNALLINEN SUUNNITTELU.....	3
2.1	Yleistä maaperästä	3
2.2	Kaivannon toiminnallinen ja tekninen suunnittelu	4
2.2.1	Lähtötiedot suunnitteluun.....	4
2.2.2	Kaivantotyyppin valinta	4
2.2.3	Tuetun kaivannon tuentatavan valinta	5
2.2.4	Tukiseinän käyttöaika	5
2.3	Tuetun kaivannon tukiseinätyypit	5
2.3.1	Teräsponttiseinä	5
2.3.2	Suihkuinjektoitu seinä.....	7
2.3.3	Settiseinä	9
2.3.4	Combi-seinä.....	10
2.3.5	Porapaalu-suihkuinjektoitu seinä.....	11
2.3.6	Patoseinät.....	12
2.3.7	Porapaaluseinä	13
2.3.8	CT-porapaaluseinä	15
2.4	Kaivannon mitoitus.....	16
2.4.1	Maanpaine yleisesti.....	16
2.4.2	Maanpaineen kehittyminen	17
2.4.3	Maanpaineen laskenta	19
2.4.4	Vedenpaine	22
2.5	Tukiseinän rakenteellinen mitoitus.....	24
2.6	Tukiseinän upotussyvyys ja pystysuuntainen stabiliteetti	25
3.	PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU JA PORAPAALUTUSTEKNIikka	28
3.1	Paalun määritelmä	28
3.2	Paaluperustuksen toiminnallinen suunnittelu.....	28
3.2.1	Maan häiriintyminen, huokospaineen nousu ja paineellinen pohjavesi	28
3.2.2	Maan tiivistyminen tai löyhtyminen	29
3.2.3	Tärinä ja melu	29
3.2.4	Muut rajoittavat tekijät	30
3.3	Porapaalutyypit ja asennustekniikka.....	30
3.3.1	Yleistä porapaaluista	30

3.3.2	Porauskalusto.....	31
3.3.3	Porausmenetelmä.....	32
3.3.4	Huuhtelu.....	35
3.4	Paaluperustuksen mitoitus.....	35
4.	CT-PORAPAALUSEINÄN SOVELLUSKOHTEET JA NIIDEN ASETTAMAT VAATIMUKSET.....	37
4.1	Pysyvä tai väliaikainen tukiseinä.....	37
4.2	Lämpöä eristävä seinä.....	37
4.3	Pilaantuneiden maiden eristysrakenteet.....	38
4.4	Lisärakentaminen maanpinnan alapuolelle rakennetussa ympäristössä.....	39
4.5	Satamarakentaminen.....	40
4.6	Tukiseinä lopullisena kantavana rakenteena.....	40
4.7	Suuret liittorakenteet CT-paaluista.....	41
4.7.1	CT-porapaalu tunnelirakentamisessa.....	41
4.7.2	Suurpaaluperustus useasta CT-paalusta.....	44
5.	KENTTÄTUTKIMUKSET.....	48
5.1	Koeasennuskohde.....	49
5.1.1	Kohteen sijainti ja valintaperusteet.....	49
5.1.2	Pohjaolosuhteet.....	49
5.2	Työn suoritus.....	50
5.2.1	Kohteen valmistelut.....	51
5.2.2	Paalujen poraus.....	51
5.2.3	Siirtymämittaukset.....	57
5.2.4	Paalujen ylösnosto.....	60
5.2.5	Porausnastojen kulumamittaus.....	61
6.	CASE-MALLINNUKSET.....	63
6.1	Käytetyt laskentamallit ja -ohjelmat.....	63
6.1.1	Jousimallimenetelmän perusteet.....	63
6.1.2	GeoCalc.....	64
6.2	Keravan koeasennus, siirtymämallinnus.....	66
6.3	Naantalın koeasennus, siirtymämallinnus.....	67
6.3.1	Yleistä.....	67
6.3.2	Pohjaolosuhteet ja ympäristö.....	68
6.3.3	Mittaukset.....	70
6.3.4	Siirtymämallinnus.....	71
6.4	Laskennan tulokset ja vertailu mittaustuloksiin.....	72
6.4.1	Kerava.....	72
6.4.2	Naantali.....	74
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	76
7.1	Yleistä.....	76
7.2	Käyttökohteet.....	78
7.3	Asennettavuus karkearakeisiin kitkamaihin.....	80

7.4	CT-porapaaluseinän uusiokäyttö	80
7.5	Siirtymämallinnus.....	81
7.6	Jatkotutkimusehdotukset.....	81
8.	YHTEENVETO.....	83
LÄHTEET		85

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>CT-porapaaluseinän periaate. (Haavisto 2016)</i>	1
Kuva 2.	<i>Tyypillinen poikkileikkaus pohjaolosuhteista pohjoismaissa. (mukaillen Rosén 2017)</i>	3
Kuva 3.	<i>Teräsponttiseinin tuettu kaivanto Kyrön alikulkusillan rakennuksen yhteydessä. (Ketonen 2017)</i>	6
Kuva 4.	<i>U-profiilin teräsponttiseinä, jossa ponttilukko sijaitsee seinän keskiakselilla (ArcelorMittal 2017a)</i>	7
Kuva 5.	<i>Suihkuinjektoitu seinä Ratinan kauppakeskuksen rakennuskaivannossa. (Reiman 2015)</i>	9
Kuva 6.	<i>Puulankuista ja teräsprofiileista koottu settiseinä. (Länsivaara 2015)</i>	10
Kuva 7.	<i>Combi-seinä, jossa Z-ponttiprofiileja on hitsattu putkipaalujen väliin. (ArcelorMittal 2017b)</i>	11
Kuva 8.	<i>Porapaalu-suihkuinjektoidun seinän periaate.</i>	11
Kuva 9.	<i>Kaivinpaaluin tuettu syvä kaivanto. (Kärki 2017)</i>	12
Kuva 10.	<i>Kitkamaassa vaikuttavan passiivisen maanpaineen arvot lepopaineen ja täyden passiivisen maanpaineen välillä suhteessa seinän siirtymän ja täyteen passiiviseen maanpaineeseen vaadittavan siirtymän suhteen v/v_p.</i>	19
Kuva 11.	<i>Virtaustilanteessa esiintyvä vedenpaine-ero. a) virtausviivaverkosto ja b) laskennassa käytettävä vedenpaine-ero</i>	23
Kuva 12.	<i>Kuvaajasta voidaan määrittää tukiseinän ulotussyvyys kaivussyvyyden funktiona. (RIL 263 2014)</i>	26
Kuva 13.	<i>Mitat, joita käytetään kaavassa, jolla arvioidaan varmuutta pohjan nousua vastaan. (RIL 263 2014)</i>	27
Kuva 14.	<i>Päältä lyövässä kalustossa isku avarrin- sekä pilottikruunulle välittyy porauskalustosta maanpinnalta poraustankojen välityksellä. Kuvasta puuttuu vasara. (Laitinen 2017)</i>	31
Kuva 15.	<i>Uppovasarakalustossa vasara lyö suoraan kuvassa näkyvää pilottikruunua. Kuvasta puuttuu vasara. (Laitinen 2017)</i>	32
Kuva 16.	<i>Siipiterällisessä avarrinkruunussa terä on kiinnitetty pilottikruunuun. (Laitinen 2017)</i>	33
Kuva 17.	<i>Keskisen porauksen periaate. (Pålkomissionen 2010)</i>	34
Kuva 18.	<i>Epäkeskisen porausmenetelmän periaate. Epäkeskisessä menetelmässä paaluputki jää kalliohyllyn päälle. (Pålkomissionen 2010)</i>	35
Kuva 19.	<i>Pilaantuneen maan eristämisen periaate. (Penttinen 2001, alkuperäinen lähde Jeltsch 1990)</i>	39

Kuva 20.	<i>Tunnelialikulun toteutus käyttäen CT-paaluista muodostuvaa holvirakennetta. (Lehtonen et. al. 2014, alkuperäinen lähde Hautamäki 2014).....</i>	<i>43</i>
Kuva 21.	<i>CT-paaluista muodostettu yksittäinen suurpaalu. Suurpaalu voidaan muodostaa tavallisesta CT-paaluelementistä (b) tai CT-paaluista, joissa T-profiili on eriävässä kulmassa tavallisesta 180 asteen kulmasta. Paalu voidaan rakentaa suljettuna ympyränä tai jättää avonaiseksi (d) tilanteissa, joissa sijaintitarkkuutta ei saada riittäväksi, kuten kohdatessa suuria lohkareita. (Lehtonen et. al. 2014, alkuperäinen lähde Laakso 2014).</i>	<i>44</i>
Kuva 22.	<i>Erityyppisiä betonilaattaperustuksia. Gravitaatioperustustyypit (a,b ja c) ja ankkuroitu laattaperustus (d). (Burton et. al. 2011).....</i>	<i>45</i>
Kuva 23.	<i>Tuulivoimaloiden perustukset monipaaluperustuksena (a) tai yksittäispaaluperustuksena (b) ja (c). (Burton et. al. 2011)</i>	<i>46</i>
Kuva 24.	<i>Koekohteen itäpuolella kulki Sköldvikin rata ja länsipuolella Helsinki-Tampere - rata. Kuvassa edessä näkyy Ylikeravantien silta asennuspaikan pohjoispuolella. Asennuspaikka sijaitsee luiskan yläpäässä porausvaunun vasemmalla puolen.</i>	<i>49</i>
Kuva 25.	<i>Pohjatutkimusleikkaus porapaaluseinän linjassa.</i>	<i>50</i>
Kuva 26.	<i>Pystysuuntaisten siirtymien mittaukset toteutettiin maahan upotetuilla harjaterästangoilla.</i>	<i>51</i>
Kuva 27.	<i>Asennettujen paalujen mitat.</i>	<i>52</i>
Kuva 28.	<i>Vasemmalla avarrinkruunun ja maakengän kiinnitys paaluun ja oikealla paalun yläpäähän jätetty siltaus, joka poistettiin porauksen jälkeen. Kuvassa hahlosto on vielä poistamatta laserleikattu teräs.</i>	<i>53</i>
Kuva 29.	<i>Porauskaluston havainnekuva mittoineen. (Laitinen 2017)</i>	<i>54</i>
Kuva 30.	<i>Paalun 5 porausnopeus syvyyden funktiona.</i>	<i>55</i>
Kuva 31.	<i>Porasoija poistui ensimmäisen paalun porauksen aikana paalun loppumitallakin ympäröivästä maasta.</i>	<i>57</i>
Kuva 32.	<i>Pystysiirtymää mitattiin kymmenessä mittauspisteessä. Kuvassa on esitetty nuolin porapaaluseinän vaakasiirtymien suunnat.</i>	<i>58</i>
Kuva 33.	<i>Osa paaluista vaurioitui pahasti yläpäästään noston yhteydessä.</i>	<i>61</i>
Kuva 34.	<i>Winklerin alustamallin perusperiaate. (Ou 2006).....</i>	<i>64</i>
Kuva 35.	<i>Jousimallin toimintaperiaate. (Ou 2006).....</i>	<i>64</i>
Kuva 36.	<i>GeoCalcin laskentamallissa tukiseinä mallinnetaan 2D palkkina ja kuormat jousina tai kuormafunktiona riippuen onko kuorma aktiivivai passiivipuolella. (Vianova 2011)</i>	<i>65</i>
Kuva 37.	<i>Maanpaineiden ja siirtymien välinen yhteys. (Vianova 2011).....</i>	<i>65</i>
Kuva 38.	<i>GeoCalc-ohjelmassa käytetty geometria Keravan koeasennuksen mallinnukseen.</i>	<i>66</i>
Kuva 39.	<i>Paalujen numerointi ja seinän leveys. (Larkela et. al. 2016)</i>	<i>67</i>

Kuva 40.	<i>Naantalin koeasennuksessa käytettyjen paalujen poikkileikkauksen mitat. (Larkela et. al. 2016)</i>	<i>68</i>
Kuva 41.	<i>Naantalin koeasetelma. (Larkela et. al. 2016)</i>	<i>68</i>
Kuva 42.	<i>Pystysiirtymämittauspisteiden sijoittelu. (Larkela et. al. 2016)</i>	<i>69</i>
Kuva 43.	<i>Kaivun aiheuttamat pystysiirtymät etäisyyden funktiona. (Larkela et. al. 2016)</i>	<i>70</i>
Kuva 44.	<i>GeoCalcissa käytetty geometria kuuden metrin mittaisen porapaaluseinän mallinnukseen</i>	<i>72</i>
Kuva 45.	<i>Keravan mitatut sekä mallinnetut siirtymäprofiilit.</i>	<i>73</i>
Kuva 46.	<i>Mitatut sekä laskennalliset siirtymät porapaaluseinässä kahdeksan metrin paaluissa.</i>	<i>75</i>
Kuva 47.	<i>Mitatut sekä laskennalliset siirtymät porapaaluseinässä kuuden metrin paaluissa.</i>	<i>75</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

D	seinän lyöntisyvyys
H	kaivannon syvyys
I	jäyhyysmomentti
K_a	aktiivisen maanpaineen kerroin
K_p	passiivisen maanpaineen kerroin
K_0	lepopainekerroin
W	taivutusvastus
a	adheesio
c	koheesio
c_u	suljettu leikkauslujuus
i_a ja i_p	hydraulinen gradientti
k	jännitystilankerroin GeoCalcissa
m	moduuliluku
p	alustapaine
p_a	aktiivinen maanpaine
p_p	passiivinen maanpaine
p_0	lepopaine
q	pintakuorma
u	huokosvedenpaine
v	seinän siirtymä
v_a	aktiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä
v_p	passiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä
β	jännitysekspONENTTI
γ	tilavuuspaino
γ'	tehokas tilavuuspaino
γ'_a	tehokas tilavuuspaino aktiivisen maanpaineen puolella
γ'_p	tehokas tilavuuspaino passiivisen maanpaineen puolella
γ_{sat}	vedellä kyllästyneen maan tilavuuspaino
γ_w	veden tilavuuspaino
δ_a	leikkauskestävyyskulma maapohjan ja seinän välissä aktiivipuolella
δ_p	leikkauskestävyyskulma maapohjan ja seinän välissä passiivipuolella
δ_{ya} ja δ_{yp}	suhteellinen siirtymä aktiiviselle ja passiiviselle maanpaineelle GeoCalcissa
ξ_{50a} ja ξ_{50p}	maanpaineen 50 % muutokseen tarvittava suhteellinen siirtymä aktiiviselle ja passiiviselle maanpaineelle GeoCalcissa
σ_a	täysin mobilisoitunut aktiivinen maanpaine
σ'_z	tehokas pystyjännitys
τ	leikkausjännitys
φ	leikkauskestävyyskulma

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

CT-porapaaluseinä on vielä tuotekehitysasteella oleva porapaaluista muodostuva seinämä. Perinteisessä ponttiseinässä (esitelty tarkemmin alaluvussa 2.3.1) tai porapaaluseinässä erilliset pontit tai paalut yhdistetään toisiinsa ulkonevilla uros- ja naarasporteilla, eli ponttilukoilla. CT-porapaalujen yhteen liittäminen eroaa perinteisestä ponttiseinästä tai muista ponttein yhdistettävistä porapaaluseinistä siten, että ulkonevan naaraspontin sijaan T:n muotoinen urospontti asetetaan C-muotoisen paalun sisään, eli erillistä naarasponttia ei tarvita. Rakenne on esitetty kuvassa 1. Tämä mahdollistaa seinän purkamisen ja uusiokäytön. Avoin ponttiratkaisu ei aiheuta naaras- ja urospontin välille suuria kitkan aiheuttamia voimia, jolloin paalut voidaan nostaa yksittäin maasta.



Kuva 1. CT-porapaaluseinän periaate. (Haavisto 2016)

Seinämälle on käytännössä kaksi pääasiallista käyttömahdollisuutta, seinän paaluperustuksena käyttäminen ja kaivantojen tuenta. Näiden lisäksi porapaalua voidaan mahdollisesti käyttää esimerkiksi pilaantuneiden maiden eristämiseen, lämmöneristeseinänä sekä vaakasuuntaan edetessä tunnelin rakenteena. Kaivantojen suunnittelussa kiinnitetään entistä enemmän huomiota turvallisuuteen ja uusia, parempia ratkaisuja tuentaan tarvitaan jatkuvasti. Tiiviissä kaupunkiympäristössä rakentaessa tilaa on jatkuvasti vähemmän ja samalla rakennusten alimpien tasojen ulottuessa syvälle, tuennalta vaaditaan riittävää jäykkyyttä, jotta ympäröivien rakenteiden siirtymät ovat riittävän pieniä. Samalla uudet rakenteet vaativat perustukset, jotka takaavat riittävän pienet painumat sekä tarvittavan stabiliteetin. Tällaisessa tilanteessa etuna on, kun yhdellä rakenteella voidaan toteuttaa molemmat.

CT-seinän paalut ovat tyypillisesti kokoluokaltaan halkaisijavälillä 76-219 mm, eli pienpaaluja. Tämä mahdollistaa pienemmän porauskaluston ja poraustilat, joten paaluja on mahdollista asentaa myös hyvin pienissä tiloissa. Lisäksi CT-rakenteen takia paalu-

seinän muoto voidaan vapaasti valita, joka mahdollistaa esimerkiksi vedenpumppaamojen kaivannoissa tilansäästöä, kun kaivannon ei tarvitse olla suorakulmainen. Lisäksi mahdollinen käyttökohde paalulle on rakennusten rakentamisen yhteydessä sekä kaivannon tukiseinänä, että lopullisen rakenteen tukipaaluna.

Tämän diplomityön tarkoituksena on kerätä tietoa erilaisten potentiaalisten käyttökohteiden suunnittelulle asetetuista vaatimuksista käyttäen hyödyksi kirjallisuutta, kuten suunnitteluohjeita, ja verrata CT-porapaaluseinän ominaisuuksia nykyisin käytettyihin ratkaisuihin. Lisäksi osana diplomityötä tehdään kenttätutkimus, jossa testataan paalun asennettavuutta karkearakeisiin kitkamaihin, jollaisissa yleensä porapaalu tulee kyseeseen. Tällaisissa olosuhteissa ponttiseinää ei välttämättä saada asennettua riittävän syvälle, joten tarve käyttökelpoisemmalle tuentaratkaisulle on olemassa.

1.2 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus tapa

Tutkimusmenetelmänä käytetään käyttökohteiden kartoituksen osalta kirjallisuustutkimusta. Kirjallisuustutkimuksessa tutkitaan mahdollisia käyttökohteita, niiden asettamia vaatimuksia rakenteille suunnittelun näkökulmasta sekä vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja erilaisissa kohteissa.

Käyttökohteita, niiden vaatimuksia sekä vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja selvitetään suunnitteluohjeiden, standardien ja tutkimusraporttien perusteella.

Paalun asennettavuutta selvittäessä tutkimusmenetelmänä käytetään kenttäkoetta. Kenttäkokeen tulokset raportoidaan ja niiden perusteella vedetään johtopäätöksiä uudelleenkäyttömahdollisuuksista sekä asennettavuudesta. Kenttäkokeessa mitataan paaluseinän siirtymät ja koetilanne mallinnetaan jousimalliin perustuvalla laskentaohjelmalla.

1.3 Tutkimuksen rajaukset

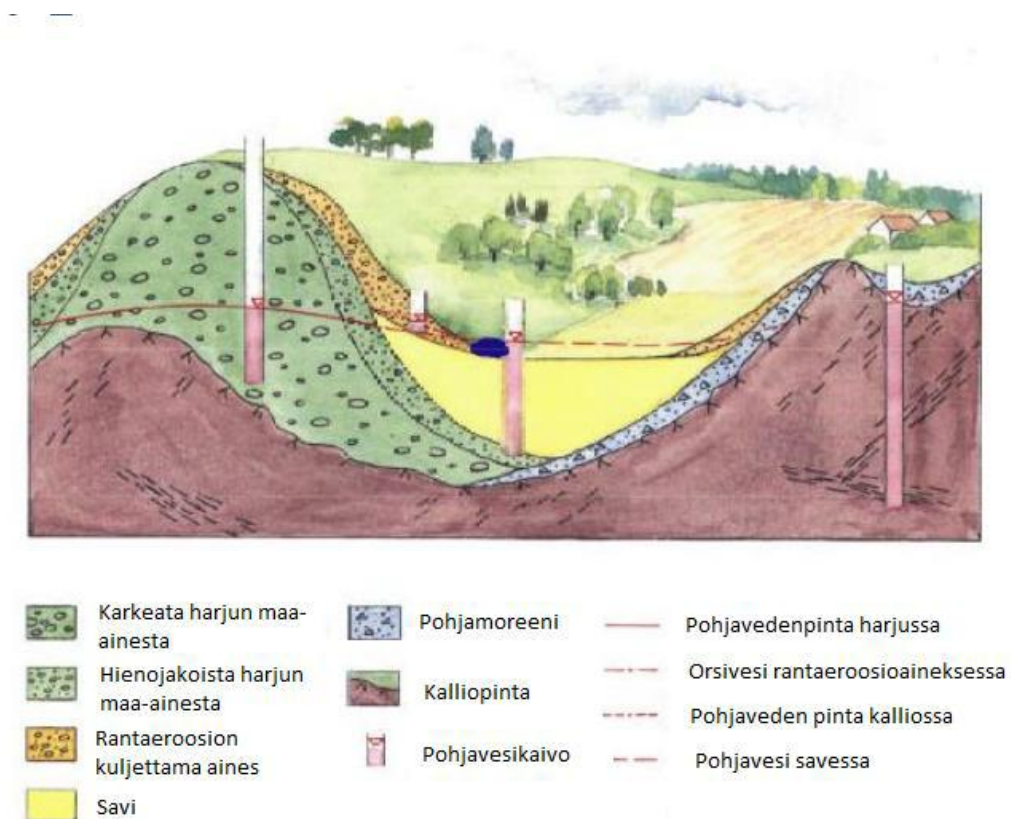
Tutkimuksessa käsitellään suunnittelun asettamia vaatimuksia tukiseinälle tai paaluperustukselle ja verrataan niitä CT-seinän ominaisuuksiin. Kenttätutkimuksilla selvitetään paalun asennettavuutta sekä uudelleenkäyttömahdollisuutta. Lisäksi tutkimuksessa käsitellään jousimalliin perustuvien laskentaohjelmien perustaa, mallinnetaan koeseinän siirtymiä ja verrataan mallinnustuloksia koetilanteessa saavutettuihin mittaustuloksiin.

Tutkimuksessa ei käsitellä paaluperustuksen laskennallista mitoittamista, eikä kaivannon mitoittamista eurokoodin mukaisesti.

2. MAANPAINESEINIEN MITOITTAMINEN JA TOIMINNALLINEN SUUNNITTELU

2.1 Yleistä maaperästä

Pohjoismaiden alueella maaperän ominaispiirteet ovat suurilta osin jääkauden aiheuttamia. Paksu jäätikkö on painollaan aiheuttanut suuria jännityksiä maa- ja kallioperään ja jäätikön sulamisvedet ja liikkeet ovat sekä aiheuttaneet maa-aineksen eroosiota että kuljettaneet maa-ainesta. Paikoitellen kalliopinta on ollut jo jääkauden aikaan korkealla ja näissä paikoissa on edelleen avokalliopinta. Paikoissa, joissa kalliopinta ei ole paljas, kalliopinnan päällä on, riippuen korkeusasemasta sekä sijainnista, kerrostunutta maa-ainesta. (Jääskeläinen 2011)



Kuva 2. Tyypillinen poikkileikkaus pohjaolosuhteista pohjoismaissa. (mukaillen Rosén 2017)

Tavallisesti kalliopinnan päällä ensimmäinen maakerros on pohjamooreenia. Pohjamooreeni on maa-ainesta, joka sisältää raekooltaan hyvin vaihtelevaa materiaalia, aina hienojakoisesta siltistä lohkaraisiin. Paikoissa, jotka ovat sijainneet jääkauden vaiheiden aikana merenpinnan alapuolella, on moreenin päälle kerrostunut hienojakoisempaa ainesta, kuten savea. Lisäksi jääkausi on aiheuttanut erilaisia muodostumia, kuten harjuja, deltoja ja päätymoreeneja. Harjuissa ja deltoissa maa-aines on lajittuneempaa karkeampaa materiaalia, kuten hiekkaa ja soraa. Harjujen ja deltojen juuressa on voinut sijaita aiemmin ranta, jolloin vesi on aiheuttanut niihin eroosiota ja kuljettanut saven päälle karkeampaa ainesta. Maa-aineksen tyypin lisäksi maaperän ominaisuuksiin vaikuttaa maaperässä oleva vesi, eli pohja- tai orsivesi. (Jääskeläinen 2011) Tyypillinen poikkeileikkaus maaperästä on esitetty kuvassa 2.

2.2 Kaivannon toiminnallinen ja tekninen suunnittelu

2.2.1 Lähtötiedot suunnitteluun

Kaivannon suunnittelu käynnistyy lähtötietojen hankinnalla. Lähtötiedoiksi suunnitteluun selvitetään muun muassa kaivannon tilavaatimus, käyttötarkoitus sekä sen ympäristössä olevat rakenteet ja infra. Samalla selvitetään kaivannon ympäristössä vallitsevat pohjasuhteet ja tarpeen mukaan määritetään lisää pohjatutkimuksia tukemaan olemassa olevaa tietoa. Mikäli olemassa olevaa tietoa pohjasuhteista ei ole, määritetään tutkimuksia niiden selvittämiseksi. Samalla kaivanto luokitellaan joko tavanomaiseksi, vaativaksi tai erittäin vaativaksi rakenteeksi, joka määrittää suunnittelijan pätevyysvaatimuksen. (RIL 263 2014)

2.2.2 Kaivantotyypin valinta

Kaivannon toiminnallisessa suunnittelussa valitaan kaivantotyyppi, eli onko kaivanto tuettu vai luiskattu. Luiskattu kaivanto on toteutukseltaan yksinkertaisin vaihtoehto, joten se on yleensä ensisijainen valinta. Luiskatun kaivannon luiskan kaltevuuteen ja siten kaivannon tilantarpeeseen vaikuttaa pääasiassa maa-aineksen lujuusominaisuudet ja kaivannon syvyys. Myös muut vaikuttavat tekijät on otettava huomioon, joita ovat kaivanto-ohjeen mukaan esimerkiksi seuraavat: (RIL 263 2014)

- kaivannon läheisyydessä vaikuttavat ulkoiset kuormitukset
- pohjaveden korkeusvaihtelut
- pohjaveden suotovirtaus
- huokospaineen nousu esimerkiksi paalutuksen johdosta
- maapohjan häiriintyminen esimerkiksi tärinän vaikutuksesta.

Luiskatun kaivannon sijaan kaivantotyyppiksi valitaan tuettu kaivanto, mikäli luiskalle ei ole tarpeeksi tilaa tai silloin, kun kaivanto on niin syvä, että luiskien takia kaivettavaa tulee huomattava määrä lisää, jolloin on taloudellisempaa tukea kaivanto. Valintaan vaikuttavat myös ympäristövaikutusten rajoittaminen, kuten sallitut muodonmuutokset lähiympäristössä, sekä kaivannon vesitiiviys. (RIL 263 2014) Kaivannon vesitiiviyttä vaaditaan esimerkiksi tapauksissa, joissa lähellä on maanvaraisia tai puupaalutettuja rakenteita, joille pohjavedenpinnan laskeminen voi aiheuttaa painumia tai puupaalujen lahoamista (Kerokoski 2017). Rakennettaessa jo rakennettuun ympäristöön, joudutaan kaivanto tukemaan lähes aina. (Länsivaara 2015)

2.2.3 Tuetun kaivannon tuentatavan valinta

Mikäli kaivanto vaatii tuentaa, tulee kaivannon tuentatapa valita. Tässä prosessissa ei välttämättä ole oikeaa tai väärää ratkaisua, vaan tuentatavan valinta on optimointia, jossa tasapainotellaan kustannusten, teknisen soveltuvuuden, ympäristöön soveltuvuuden sekä asennustyön vaativuuden ja turvallisuuden kanssa. (RIL 263 2014)

Jos pohjaolosuhteet ovat tavanomaiset ja homogeeniset, kaikki tukiseinätyypit ovat teknisesti soveltuvia, joten tällaisissa olosuhteissa pääpaino tukiseinätyypin valinnassa on rakennuskustannuksissa ja tarvittavassa rakennusajassa. Kun olosuhteet muuttuvat vaativammiksi, käyttökelpoiset tukiseinätyypit vähenevät. Tällöin valinta tapahtuu pitkälti tukiseinän erityisominaisuuksien mukaan. (RIL 263 2014)

2.2.4 Tukiseinän käyttöaika

Kaivantojen tukirakenteet jaetaan usein työnaikaisiin, eli väliaikaisiin tukiseiniin sekä pysyviin tukiseiniin (RIL 121 2004). Väliaikaiset rakenteet, joiden käyttöikä on lyhytaikainen, poistetaan usein käytön jälkeen, mikäli poisto ei aiheuta liiallisia siirtymiä ympäröiville rakenteille. Pysyvä tukiseinä taas palvelee yleensä jonkinlaista rakennetta koko rakenteen käyttöiän, kuten hissikuilua, joka rakennetaan maanpinnan alapuolelle. Tukiseinälle voi myös olla muita käyttötarkoituksia kaivannon tukemisen lisäksi, kuten sen käyttäminen penkereen stabiliteetin parantamiseen tai lopullisessa rakenteessa paaluna. Tukiseinän käyttämistä paaluna käsitellään luvussa 3.

2.3 Tuetun kaivannon tukiseinätyypit

2.3.1 Teräsponttiseinä

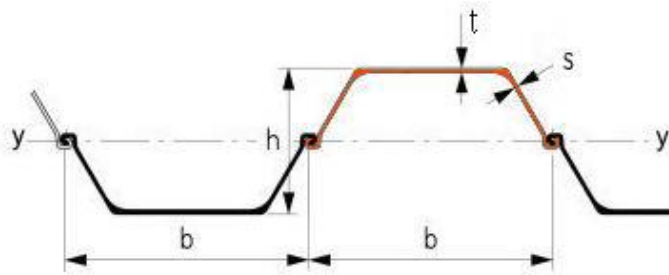
Teräsponttiseinää käytetään kaivantojen tuennassa ja se on yleisin käytetty tuentamethodi. Tämä johtuu ponttiseinän kokonaistaloudellisesta edullisuudesta verrattuna muihin menetelmiin sekä asentamisen ja purkamisen nopeudesta. (RIL 263 2014)

Teräsponttiseinä koostuu teräsponteista, jotka asennetaan joko lyömällä tai täryttämällä maahan. Pontit muodostavat yhtenäisen rakenteen lukkourilla, jotka kiinnittyvät toisiinsa, mutta pontit voidaan asentaa myös limittäin lukitsematta niitä toisiinsa. Limittäin asentaessa ponttiseinän vedenläpäisevyys ja taivutusvastus pienentyvät huomattavasti. Kuvassa 3 on esitetty teräsponttiseinin tuettu kaivanto. (RIL 264 2014)



Kuva 3. Teräsponttiseinin tuettu kaivanto Kyrön alikulkusillan rakennuksen yhteydessä. (Ketonen 2017)

Lukkouran sijainnin mukaan teräsponttiseinän malli voi olla joko Z-profiili tai U-profiili. Z-profiilissa lukko sijaitsee ponttiseinän ulkoreunassa, jolloin yksittäinen pontti on ikään kuin Z-kirjaimen muotoinen, kun taas U-profiilin ponttiseinässä ponttilukko sijaitsee seinän keskiakselilla, jolloin yksittäinen pontti on U-kirjaimen muotoinen. U-profiilisen teräsponttiseinän rakenneleikkaus on esitetty kuvassa 4. (RIL 263 2014)



Kuva 4. U-profilin teräsponttiseinä, jossa ponttilukko sijaitsee seinän keskiakselilla (ArcelorMittal 2017a)

Teräsponttiseinää voidaan käyttää useimmissa maaperäolosuhteissa, mutta tiiviisiin karkearakeisiin kitkamaihin ja kivisiin tai lohkarakeisiin pohjamaihin ponttiseinää ei saada upotettua. Tiiviiseen moreeniin ponttiseinän upottaminen onnistuu usein täryttämällä, kun ympärillä oleva moreeni häiriintyy. Jos maaperä koostuu löyhästä karkearakeisesta materiaalista, asennuksen yhteydessä voidaan kokea ongelmia, kun ponttien upotus tiivistää ympärillä olevaa maata, jolloin pontteja ei saada tavoitetasoon. Ponttien upotusta voidaan myös edesauttaa löyhennysporauksella, joka on kuitenkin kallis toimenpide. (RIL 263 2014)

Pontin lyöminen sekä täryttäminen aiheuttavat ympäristössä tärinää, joka tiivistää maainesta pontin läheisyydessä ja tämän myötä maa painuu. Painuma ulottuu noin pontin mitan etäisyydelle pontin ympäristöön, mutta joissain olosuhteissa se voi ulottua pidemmällekin. (RIL 263 2014)

Maanpaineen vaikutuksesta ponttiseinään aiheutuu siirtymiä, jolloin tukiseinän taustalla tapahtuu painumaa suhteessa siirtymän suuruuteen. Normaalisti suunnittelussa pyritään maksimoimaan pontin lujuuden käyttöaste, jolloin siirtymät ovat suhteellisen suuria ja täten myös painumat. Kaivanto-ohjeen mukainen suurin sallittu sivuttaissiirtymä ponttiseinälle on 200 mm. Painumaa voidaan hillitä suunnittelemalla ponttiseinä jäykemmäksi, jolloin sivuttaissiirtymät ovat pienempiä. (RIL 263 2014)

2.3.2 Suihkuinjektoitu seinä

Suihkuinjektoitu seinä muodostuu maa-aineksen ja sidosaineen sekoitetta olevista pilareista, jotka limittyvät toistensa suhteen. Sidosaine injektoidaan maa-ainekseen siten, että ensin porataan suuttimella varustettu kruunu tukiseinän haluttuun alapään tasoon, jonka jälkeen poraputkea nostetaan tietyllä nopeudella samalla suutinta pyörittäen. Suutin suihkuttaa maahan sementti-vesiseosta suurella paineella, jolloin maan rakenne rikkoutuu ja hienoaaines purkautuu lietteenä maanpinnalle. Maan hienoaaines korvautuu sementillä. Tämän jälkeen sementti alkaa lujittua ja sementin ja maa-aineksen seoksesta muodostuu pilari. (RIL 263 2014)

Suihkuinjektoitu seinä ei kestä ollenkaan vetojännityksiä, jonka takia se toimii tukitasojen välisenä holvirakenteena. Seinän pilarit suunnitellaan yleensä halkaisijaltaan melko suureksi, sillä seinän tulee olla lähes siirtymätön rakenne. Siirtymättömyytensä vuoksi se sopii hyvin paikkoihin, jossa ympäristöllekään ei sallita suuria siirtymiä. Samalla suihkupaalua voidaan käyttää olemassa olevien rakenteiden perustuksen vahvistuksena, joka siirtää pystysuuntaisia kuormia. Tällaisessa menetelmässä on kuitenkin riskinä olemassa olevien rakenteiden painuminen, sillä ennen lujittumistaan suihkuinjektoitu maa-aines menettää suuren osan kantavuudestaan. (RIL 263 2014)

Suihkuinjektoitu seinä sopii lähes kaikenlaisiin pohjaolosuhteisiin, mutta hyvin pehmeissä savissa tai eloperäisissä maalajeissa voidaan joutua tekemään erityistoimenpiteitä, jotta suihkuinjektointi onnistuu. Tällaisissa olosuhteissa seinän käyttö tulee harkita tapauskohtaisesti. Maaperässä ei saa tapahtua suurta pohjaveden virtausta, jotta suihkutettu sidosaine ei huuhtoudu sen mukana. Jos maaperä sisältää lohkaraita, suihkuinjektointi ei läpäise niistä ja seinästä tulee epähomogeeninen. Maaperässä olevat tyhjätilat tulee täyttää ennen suihkuinjektointia, jottei suihkutettava aines leviä hallitsemattomasti niihin. (RIL 263 2014)

Suihkuinjektoidun seinän lujuuden kehitys on täysin riippuvainen maa-aineksesta. Lujuus kehittyy suuremmaksi kitkamaalajeissa, kuin savissa. Suihkutusta voidaan käyttää myös sulfaattipitoisissa maaperissä, mutta suihkutettavan sementin tulee olla SR- eli sulfaatinkestävää sementtiä. (RIL 263 2014)

Suihkuinjektoitua seinää ei voida rakentaa olosuhteissa, joissa se voi jäätymä, sillä se ei kestä jäätymistä. Seinälle aiheuttaa myös ongelmia ympäristö, jossa on paljon olemassa olevia putkia tai kaivoja. Suihutus tapahtuu suurella paineella, joka rikkoo helposti ympäröiviä rakenteita ja suihkutettava aines kulkeutuu paineen vaikutuksesta nopeasti esimerkiksi putkissa. (RIL 263 2014)



Kuva 5. *Suihkuinjektoitu seinä Ratinan kauppakeskuksen rakennuskaivannossa.*
(Reiman 2015)

Kaivanto-ohjeen (RIL 263 2014) mukaan suihkuinjektoitua seinää käytetään tukiseinäinä lähinnä erikoistapauksissa. Tällaisia ovat esimerkiksi teräsponttiseinän ja kallion välin tiivistäminen vesitiiviiksi tai teräsponttiseinän jatkaminen suihkupilareilla kallio-pintaan asti, kun teräspontteja ei saada upotettua kallioon asti. Näiden lisäksi seinä on käyttökelpoinen, kun läheisyydessä on siirtymälle herkkiä rakenteita. Kuvassa 5 kaivanto on tuettu suihkuinjektoidulla seinällä. Kohteessa kaivanto on hyvin syvä ja kaivannon välittömässä läheisyydessä on rakennuksia, joten siirtymien on pysyttävä pieninä.

2.3.3 Settiseinä

Settiseinä muodostuu settilankuista tai -parruista, jotka tuetaan pystysuoraan, 1...4 m välein asennettaviin pystypalkkeihin. Pystypalkit ovat yleensä I- tai U-profiileja ja settilankut puulankkuja, teräsprofiileja tai teräsbetonielementtejä. Pystypalkit ankkuroidaan kaivannon ulkopuolelle. Settiseinän käyttökohteiden maaperä on yleensä kitkamaata. Rakenteestaan johtuen settiseinä ei ole vedenpitävä. (RIL 263 2014) Perinteinen settiseinärakenne on esitetty kuvassa 6.

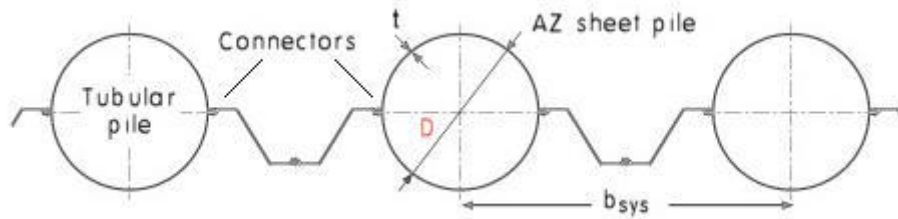


Kuva 6. Puulankuista ja teräsprofiileista koottu settiseinä. (Länsivaara 2015)

Settiseinän asennus tapahtuu kaivamalla ja tämän jälkeen settilankkujen sekä pystypalkkien paikalleen asennuksella. Asennustavasta johtuen seinän taustalla olevan maan aineksen tulee olla siinä määrin koossapysyvää, että settiseinä ehditään asentaa paikalleen. Samasta syystä seinän taustalle jää tyhjättilaa, joka täyttyessään voi aiheuttaa painumia läheisyydessä oleville rakenteille. Näiden takia settiseinä soveltuu huonosti pehmeille koheesiomaille. (RIL 263 2014)

2.3.4 Combi-seinä

Combi-seinä yhdistää sekä porapaaluseinän, että ponttiseinän parhaat puolet. Se muodostuu vuoroittaisista primääri- ja sekundaarielementeistä. Primäärielementtinä käytetään taivutuskapasiteetilta suurta elementtiä, kuten putki-, H- tai laatikkoprofiilia. Sekundaarielementtejä käytetään tekemään seinästä yhtenäinen. Sekundaarielementit ovat tavallisesti U-, Z- tai litteitä profileja. Combi-seinän hyöty on sen suuri taivutuskapasiteetti sekä kyky vastaanottaa pystykuormia. Kuvassa 7 on esimerkki combi-seinärakenteesta.

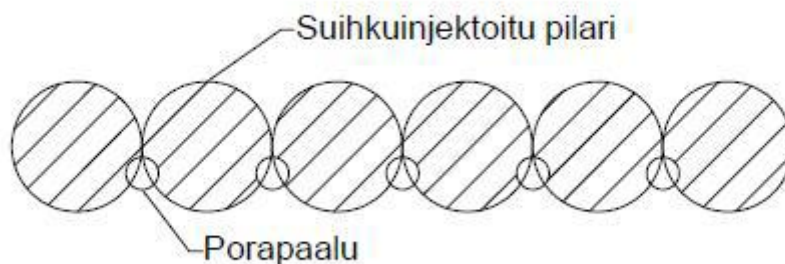


Kuva 7. Combi-seinä, jossa Z-ponttiprofiileja on hitsattu putkipaalujen väliin. (ArcelorMittal 2017b)

2.3.5 Porapaalu-suihkuinjektoitu seinä

Porapaalu-suihkuinjektoidun seinän rakenne on yhdistelmä porapaaluja ja suihkutettuja pilareita. Rakenteen periaate on esitetty kuvassa 8. Porapaalujen tehtävä seinässä on ottaa vastaan seinään kohdistuvat taivutusmomentit ja suihkuinjektoidut pilarit toimivat porapaalujen välissä seinää tiivistävänä rakenteena. Suihkuinjektoidujen pilarien tiivistävän vaikutuksen ansiosta seinä voidaan rakentaa vesitiiviiksi. (RIL 263 2014)

Seinä rakennetaan siten, että ensimmäisenä porapaalut porataan haluttuun syvyyteen, jonka jälkeen niiden väliin suihkuinjektoidaan pilarit. Jos seinä halutaan rakentaa vesitiiviiksi, suihkuinjektoidujen pilarien tulee leikata paalut koko paalun pituudelta siten, että paalujen ja suihkuinjektoidujen pilarien väliin ei jää injektoimatonta maa-ainesta. Suunnittelussa tulee huomioida erityisesti paalujen ja suihkuinjektoidujen pilarien mahdolliset sijainti- ja kaltevuuspoikkeamat, joiden takia suihkuinjektoidujen pilarien halkaisijan tulee olla riittävän suuri, jotta edellä mainittu toteutuu. (RIL 263 2014)



Kuva 8. Porapaalu-suihkuinjektoidun seinän periaate.

Kuten suihkuinjektoidun seinän yhteydessä mainittiin, suihkuinjektoidut pilarit eivät kestä vetojännityksiä. Tämän johdosta taivutusta vastaanottavat porapaalut on suunniteltava mahdollisimman jäykäksi ja lähes siirtymättömäksi rakenteeksi, jotta taivutus ei siirry suihkupilareille. Tämä voidaan toteuttaa joko tarpeeksi suurilla ja jäykillä porapaaluilla tai betonoimalla ja raudoittamalla paalut sisäpuolelta. (RIL 263 2014)

Suihkuinjektoidussa porapaaluseinässä sopivan maaperän osalta määrittävä tekijä on suihkuinjektoidut pilarit. Tämän takia suihkuinjektoitu-porapaaluseinää voidaan käyttää samanlaisiin olosuhteisiin, kuin suihkuinjektoitua seinääkin. (RIL 263 2014)

2.3.6 Patoseinät

Patoseinä on yleisnimitys, jota käytetään sekä kaivantoseinistä, että kaivinpaaluseinistä. Kaivinpaaluseinä voidaan tehdä siten, että paalut sivuavat toisiaan tai leikkaavat toisensa. Seinä on vedenpitävä vain, jos paalut leikkaavat toisensa. Kaivinpaaluseinän käyttökohteet ovat tavallisesti syviä kaivantoja, joiden tulee olla vedenpitäviä. Kun paalut leikkaavat toisensa, joka toinen paaluista on raudoitettu ja joka toinen raudoittamaton. Kaivinpaaluseinän rakentaminen aloitetaan asentamalla teräsbetoniset ohjainpalkit, joiden ohjauksella tehdään raudoittamattomat paalut. Raudoittamattomien paalujen rakentamisen jälkeen niiden väliin asennetaan raudoitettu paalu. (Korhonen et al 1986, Rantamäki & Tammirinne 1996) Kuvassa 9 on esitetty kaivanto, joka on tuettu kaivinpaaluseinällä.



Kuva 9. Kaivinpaaluin tuettu syvä kaivanto. (Kärki 2017)

Vedenpitävässä kaivinpaaluseinässä raudoitus- ja työjärjestys johtuu kaivinpaalun rakentamisen työtekniikasta. Kaivinpaalua tehtäessä ensin asennetaan kaivinpaalun työputki määräsyvyyteen hiertämällä tai vaihtoehtoisesti lyömällä, jonka jälkeen sen sisälle jäävä maa-aines poistetaan esimerkiksi auger-kairalla. Tyhjään työputkeen valetaan sementtiä sisälle, jonka jälkeen työputki poistetaan. Raudoitetut kaivinpaalut asennetaan raudoittamattomien väliin samalla periaatteella. (RIL 263 2014)

Kaivantoseinä koostuu maan sisään valettavista teräsbetonielementeistä. Kaivanto, johon elementit asennetaan, kaivetaan auki kaivinkoneen kahmarikauhalla, jonka jälkeen

raudoituselementit asennetaan yksi kerrallaan. Väliaikainen kaivannon tuenta tehdään sementtilietteilä, jonka paine on oltava suurempi kuin pohjaveden paine. (Länsivaara 2015)

Patoseinät soveltuvat hyvin lähes kaikenlaisiin pohjaolosuhteisiin. Patoseinät ovat yleensä hyvin jäykkiä, joten ne aiheuttavat hyvin pieniä siirtymiä ympäristöön ja ne ovat tarvittaessa vedenpitäviä. Vähäisten ympäristövaikutusten takia niitä käytetään yleensä syvissä kaivannoissa, joissa vaaditaan vesitiiviyttä. Ne ovat kuitenkin hitaita ja kalliita rakentaa, jonka takia ne tulevat yleensä kyseeseen vain, jos seiniä voidaan käyttää osana lopullista rakennetta. (RIL 263 2014)

2.3.7 Porapaaluseinä

Suomessa tällä hetkellä yleisesti käytetty porapaaluseinäratkaisu on RD-porapaaluseinä, joka perustuu perinteiseen teräspaaluun, johon on kiinnitetty sekä uros- että naaraspon-tti. Saatavilla olevat koot ovat välillä 220-1200 mm. (SSAB 2015)

Porapaaluseinä muodostuu porapaaluista, jotka yhdistetään toisiinsa jatkuvaksi raken-teeksi paaluun kiinnitetyllä lukkoprofiililla. Porapaaluseinän asentaminen eroaa yksit-täisten porapaalujen asentamisesta vain avarrinkruunun koon osalta. Porapaaluseinässä käytettävän avarrinkruunun halkaisijan tulee olla suurempia, kuin porapaalun ulkohal-kaisijan ja leveämmän ponttilukon yhteenlaskettu mitta. (RIL 263 2014, SSAB 2015) Käytettäväksi suositellaan 50-60 mm paalun halkaisijaa suurempaa avarrinkruunua. (SSAB 2015) Avarrinkruunun suuremman koon takia porauksen yhteydessä porakruu-nuun aiheutuu suurempia jännityksiä. Näiden johdosta RD-porapaaluseinässä käytettävä pienin mahdollinen paaluhalkaisija on arvioiden mukaan 168,3 mm, ja pienin suositeltu halkaisija 219,1 mm. (Uotinen & Jokiniemi 2013)

Porapaaluseinän taivutusjäykkyys on muihin tuentaratkaisuihin (pl. patoseinät) verrat-tuna suuri ja sitä voidaan varioida muuttamalla porapaalun halkaisijaa ja teräslaatua. Tämän johdosta sen suunnittelussa voidaan optimoida tukitasojen sijainti ja määrä. (RIL 263 2014, SSAB 2015)

Porapaaluseinälle soveltuvat kaikki pohjaolosuhteet. Kaivanto-ohjeen mukaan asennus-ta ei kuitenkaan voida tehdä maaperään, joka sisältää metalliromua. (porapaalun asen-nustekniikka on kuvattu tarkemmin luvussa 3). (RIL 263 2014, SSAB 2015)

Porapaaluseinän lukkoliitokset eivät lähtökohtaisesti ole vesitiiviitä, mutta jos maaperä sisältää riittävästi hienoainesta ja vedenpaine-ero on tarpeeksi pieni, vuotoveden muka-na lukkoliitokseen kulkeutuva hienoaines tukkii yleensä lukkoliitokset. Tällaisessa ta-pauksessa työnaikaisena tukiseinäenä käytettäessä porapaaluseinää voidaan pitää veden-pitävänä. (RIL 263 2014, SSAB 2015)

Kun maaperä muuttuu karkeammaksi ja hienoainespitoisuus vähenee, maa-aineksen vedenläpäisevyys kasvaa. Tällöin ponttilukkoihin kulkeutuu vähemmän hienoaainesta ja seinän vedenpitävyys huononee. Vedenpaine-eron kasvaminen seinän eri puolilla lisää myös vuotoa. (RIL 263 2014, SSAB 2015)

Kun vedenpitävyyttä vaaditaan pidemmäksi aikaa tai olosuhteissa, joissa ponttilukot eivät tiivisty hienoaineksella, voidaan tehdä erilaisia toimenpiteitä, jolla lukkoliitos voidaan tiivistää. Tämä voidaan toteuttaa lukon sisäpuolelle asennettavalla tiivistaineella, injektoimalla tai hitsaamalla. Hitsatessa voidaan hitsata joko lukkoliitos umpeen tai erillinen teräslevy paalujen väliin, jolloin myös lukon ja teräslevyn välinen tila voidaan injektoida. (RIL 263 2014, SSAB 2015)

Vedenpitävyyteen voi vaikuttaa myöskin tilanne, jolloin porapaaluseinä ulotetaan kalliioon asti ja yksittäinen paalu halutaan porata edellistä paalua pidemmälle, jolloin ponttia ei voida ulottaa koko paalun matkalle. Tällöin ylisuuresta avarrinkruunusta johtuen paalun reunoille jää tyhjätilaa, jonka kautta veden virtaaminen on teoriassa mahdollista. Kokemuksen perusteella kuitenkin tyhjätila täyttyy hienojakoisella porasoijalla, joka estää virtauksen. (Uotinen & Jokiniemi 2013, Miettinen 2014, Tirkkonen 2015)

Porapaaluseinän ympäristöön aiheuttamat siirtymät riippuvat maaperän ominaisuuksista, seinän siirtymästä sekä porapaalun porauksessa käytettävän avarrinkruunun ja paalun halkaisijan kokoerosta. Seinän siirtymää voidaan kontrolloida seinän taivutusjäykkyyttä ja ankkurointia muuttamalla. Avarrinkruunun ylikoon aiheuttama painuma johtuu paalun ympärille muodostuvasta tyhjätilasta. Tämän ympäristössä aiheuttamaa painumaa on vaikea arvioida, sillä riippuen maaperän ominaisuuksista, tyhjätila täyttyy porasoijalla ja ympäröivällä maalla. Poraamisessa käytettävä paineilma voi myös päästä karkaamaan ympäröivään maaperään ja voi aiheuttaa häiriintymistä maaperässä, jonka vaikutuksesta painumat voivat kasvaa. Mikäli painumat ovat hyvin kriittisiä, voidaan porapaaluille tehdä koeasennus ja mitata tapahtuvia siirtymiä. (RIL 263 2014, SSAB 2015)

Porapaaluseinän asentaminen ei yleensä aiheuta haitallista tärinää ympäristöön. Asennuksen aiheuttamaa tärinää on käsitelty enemmän luvussa 3. (RIL 263 2014)

Porapaaluseinän porausnopeus on lähes täysin riippuvainen pohjaolosuhteista, joten porauksen nopeus voidaan arvioida kohtuullisen tarkasti, mutta asennus on kuitenkin monta kertaa hitaampaa, kuin ponttiseinän (Uotinen & Jokiniemi 2013). Myös materiaalikulut ovat korkeat, joten tavallisesti se tulee kyseeseen vain kohteissa, joissa muiden tukiseinätyyppien ominaisuudet eivät ole riittävät olosuhteisiin nähden. Tällaisia voivat olla esimerkiksi rakennuskohde, jossa on vaatimus vedenpitävyydestä, pohjaolosuhteet, joissa muita tukiseinätyyppejä ei saada asennettua, seinältä vaaditaan suurta taivutusjäykkyyttä tai sijaintitarkkuusvaatimus on suuri. Se voi tulla kyseeseen myös kohteissa, joissa porapaalut toimivat lopullisessa rakenteessa kantavana rakenteena. (RIL 263 2014, SSAB 2015)

RD-porapaaluseinää on käytetty useissa rakennuskohteissa sekä Suomessa, että ulkomailla menestyksekkäästi. Tavallinen käytötapa on ollut tukiseinänä. Muutamia esimerkkejä kohteista ovat Pasilaan rakennettavan uuden ostoskeskuksen Pasilan Triplan maan alle ulottuvan osan kaivannon tuenta sekä Peterheadin satamalaituri Skotlannissa (Vunneli 2015, van Breukelen 2017).

2.3.8 CT-porapaaluseinä

CT-porapaaluseinän asennustekniikka on hyvin samankaltainen, kuin RD-porapaaluseinän, mutta johtuen paalujen liitostekniikasta, avarrinkruunun ylikoon ei tarvitse olla niin suuri kuin perinteisessä porapaaluseinässä, jossa on urosponatin lisäksi erillinen naarasponatti.

CT-porapaaluseinän tämänhetkiset suunnitellut koot ovat välillä 76-219 mm, eli paalujen halkaisijaväli on pienempi, kuin RD-porapaaluseinissä. Verrattuna RD-porapaaluseinään, geometrisen poikkileikkauksen ainoa eroavaisuus on paalujen ponttiliitos. Kun paalun halkaisija pienentyy, mutta muut dimensiot pysyvät samana, paalun poikkileikkauksen pinta-ala pienentyy. Paalun poikkileikkauksen pinta-alan pienentyessä, myös paalun taivutusjäykkyys pienenee.

CT-porapaaluseinälle käyttökelpoiset pohjaolosuhteet ovat samanlaiset, kuin tavalliselle porapaaluseinälle. Porapaaluseinä tukiseinänä tulee harvoin kyseeseen, mikäli ponttiseinä on mahdollista asentaa, sillä sen kustannukset ovat korkeammat verrattuna ponttiseinään. Tämän takia tavallisesti käyttökelpoiset olosuhteet CT-porapaaluseinälle ovat sellaiset, jossa on vaikeasti läpäistäviä maakerroksia, eli esimerkiksi sekalaisia täyttöjä tai karkeaa moreenia.

CT-porapaaluseinän vesitiiviyyttä ei ole tutkittu, mutta johtuen sen avonaisesta lukkoprofiilista, todennäköisesti seinää on vaikea saada vesitiiviiksi, erityisesti tilanteissa, joissa kaivannon eri puolien välinen vedenpaine-ero on suuri. Tätä tukee havainto, että myös RD-porapaaluseinän vesitiiviiksi saaminen on käytännössä hankalaa tällaisissa olosuhteissa, vaikka sen ponttilukko on tiiviimpi (Vunneli 2015). Veden virtausmäärää kaivannon sisälle voidaan kuitenkin pienentää käyttämällä paalun porauksessa sementti-huuhtelua, jolloin sementti tiivistää liitosta.

CT-porapaaluseinän asennuksen aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat hyvin samankaltaiset, kuin tavallisen porapaaluseinän. Havainnoista koeasennusten aikana on kerrottu tarkemmin alaluvuissa 5.2. ja 6.3. Erotuksena tavalliseen porapaaluseinään on avoin lukkoprofiili, jonka kautta porauksessa käytettävä paineistettu ilma tai neste pääsee paikenemaan ympäröivään maa-ainekseen aiheuttaen mahdollisesti maa-aineksen häiriintymistä.

2.4 Kaivannon mitoitus

Kaivannon toiminnallisen suunnittelun jälkeen suunnittelijan tehtävänä on kaivannon mitoitus. Tuetun kaivannon ollessa kyseessä tämä aloitetaan ulkoisten kuormien sekä maa-aineksen laskentaparametrien määrittämisestä. Maa-aineksen parametrit ja mitoituskannan geometria päätellään tehtyjen pohjatutkimuksien, jotka suunnittelija määrittää pohjatutkimusohjelmassa, perusteella. Kaivannon mitoitukseen tarvittavia tietoja ovat esimerkiksi maakerrosten syvyydet vastuskairausten ja näytteiden perusteella, maan leikkauslujuus, joka määritetään joko tehokkaina parametreinä näytteiden avulla laboratorioissa tai suljettuna leikkauslujuutena siipikairausten perusteella, kalliopinnan sijainti, joka voidaan selvittää porakonekairauksin, sekä pohjavedenpinnan sijainti, joka määritetään pohjavesiputkien avulla. Ulkoisten kuormien suuruuden ja maaparametrien perusteella määrittyvät tukiseiniin kohdistuvat kuormat. (Länsivaara 2015, Jääskeläinen 2011)

Kaivannon ulkopuolelta kaivannon tukiseiniin kohdistuvat kuormat ovat:

- maanpaine
- vedenpaine
- maanpinnalla olevien kuormien aiheuttama paine
- maan tiivistämisestä aiheutuva paine
- maan jäätymisestä syntyvät kuormat
- muut ulkoiset voimat ja paineet.

Näistä merkittävimmät ovat maan- ja vedenpaine. Maanpaine vaikuttaa jokaisessa kaivannossa ja vedenpaine kaivannoissa, joiden tuenta ulottuu pohja- tai orsivedenpinnan alapuolelle. (Rantamäki & Tammirinne 1996)

2.4.1 Maanpaine yleisesti

Maanpaine tarkoittaa kosketuspainetta, jonka maamassan tai ulkoisten kuormien aiheuttama paino vaikuttaa maan ja rakenteen kosketuspinnassa. Sen suuruus, suunta ja jakautuminen määrittyvät maakerrosten ja sen ominaisuuksien, tukirakenteen muodon ja liikkeiden sekä seinän tuentavan perusteella.

Maanpaine on jaettu kolmeen perusarvoon, lepo-, aktiivi- ja passiivipaineeseen. Lepopaine on maanpaine, joka vaikuttaa, kun seinässä ei tapahdu ollenkaan siirtymiä. Jos taas seinässä tapahtuu siirtymiä, seinään kohdistuvan paineen suuruus on lepo- ja aktiivi- tai passiivipaineen välillä. Aktiivi- ja passiivipaine kuvaavat maanpaineen ääriarvoja

siirtymätilassa. Aktiivinen maanpaine muodostuu seinän ulkopuolelle, eli se on seinää kaatava voima, kun taas passiivinen maanpaine muodostuu seinän kaivannon puolelle, joten se on seinää tukeva.

Maanpaineiden laskennan perustana käytetään usein Coulombin maanpaineteoriaa, eli klassista maanpaineteoriaa. Klassisessa maanpaineteoriassa oletetaan, että siirtymien tapahtuessa maa menee murtotilaan, kun tukirakenne siirtyy suuntansa säilyttäen tai kiertyy alapäänsä ympäri. Mikäli rakenne on siirtymätön, maan ei voi olettaa menevän murtoon, joten lepopaine määritetään kimmoteorian pohjalta tai kokeellisesti. (Rantamäki & Tammirinne 1996)

Syvissä kaivannoissa usein maanpaineseinät tuetaan useammalta tasolta, jolloin suoritettujen mittausten perusteella maanpaine ei jakaudukaan klassisen maanpaineteorian mukaan. Tällöin maanpaineita voidaan tasoittaa kokemukseräisten menetelmien mukaan tai se voidaan määrittää laskentaohjelmien avulla jousimenetelmin tai elementtimenetelmällä. (Kärki 2010)

2.4.2 Maanpaineen kehittyminen

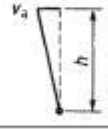

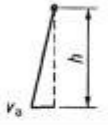

Kuten edellä todettiin, maanpaineen arvo vaihtelee maanpaineen ääriarvojen, eli passiivi- ja aktiivipaineen välillä. Aktiivi- ja passiivipaineen täydelle kehittymiselle vaadittaville siirtymille on esitetty erilaisia arvoja. Kaivanto-ohjeen antamat arvot on esitetty taulukossa 1 (RIL 263 2014)

Taulukko 1. Maanpaineen kehittymiseksi vaadittavat siirtymän arvot kaivanto-ohjeen mukaan. H_a on sen seinän osan korkeus, johon aktiivinen maanpaine kohdistuu. H_p on sen seinäosan korkeus, johon passiivinen maanpaine kohdistuu.

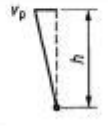
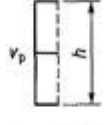
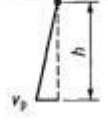
Maalaji	Aktiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä	Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä
Tiivis hiekka	0,0005 H_a	0,002 H_p
Löyhä hiekka	0,002 H_a	0,006 H_p
Kiinteä savi	0,01 H_a	0,02 H_p
Pehmeä savi	0,02 H_a	0,04 H_p

Maanpaineen mobilisoitumiseen vaikuttaa myös seinän siirtymistapa, jota ei edellä olevassa taulukossa ole huomioitu millään tavalla. Eurokoodin suunnitteluohjeessa RIL 207 2009 esitetään kitkamaissa vaikuttavien paineiden mobilisoitumiseen vaadittavat siirtymät siirtymätyypeittäin. Täyden aktiivisen maanpaineen kehittymiseen vaadittavat siirtymät siirtymätyypeittäin on esitetty taulukossa 2 ja täyden passiivisen maanpaineen kehittymiseen vaadittavat siirtymät siirtymätyypeittäin taulukossa 3.

Taulukko 2. Täyden aktiivipaineen kehittymiseksi vaadittavat likimääräiset siirtymät kitkamaassa. Taulukossa v_a on täyden aktiivisen maanpaineen kehittävä seinän siirtymä ja h seinän korkeus. (RIL 263 2014)

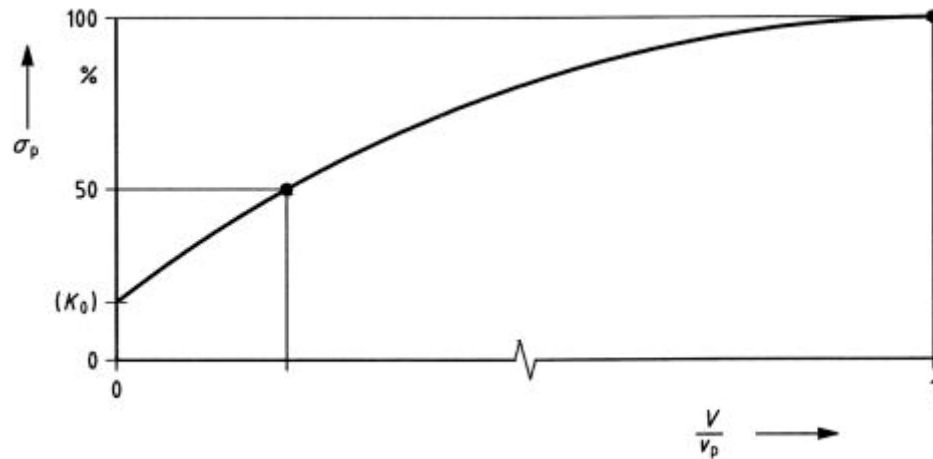
Seinän siirtymän tyyppi		v_a/h löyhä maa %	v_a/h tiivis maa %
a)		0,4...0,5	0,1...0,2
b)		0,2	0,05...0,1
c)		0,8...1,0	0,2...0,5
d)		0,4...0,5	0,1...0,2

Taulukko 3. Täyden passiivipaineen kehittymiseksi vaadittavat likimääräiset siirtymät kitkamaassa. Taulukossa v on seinän siirtymä, v_p on täyden passiivisen maanpaineen kehittävä siirtymä, h on seinän korkeus ja σ_p on täysin kehittynyt maanpaine. (RIL 263 2014)

Seinän siirtymän tyyppi		v_p/h (v/h 0.5 σ_p)%	v_p/h (v/h 0.5 σ_p)%
		löyhä maa	tiivis maa
a)		7(1,5)...25(4,0)	5(1,1)...10(2,0)
b)		5(0,9)...10(1,5)	3(0,5)...6(1,0)
c)		6(1,0)...15(1,5)	5(0,5)...6(1,3)

Mikäli siirtymät ovat pienempiä, kuin taulukossa esitetyt, ei kehity täyttä aktiivista tai passiivista maanpainetta. Tällöin maanpaineen arvo voidaan laskea kokemukspäristen sääntöjen mukaan tai käyttäen laskentaohjelmistojen jousi- tai elementtimenetelmiä. Passiivipaine esiintyy yleensä vain tukiseinän kaivannon puolella kaivannon pohjan

alapuolella, jolloin se noudattaa klassista maanpaineteoriaa. Sen suuruuden suhdetta siirtymään lepopaineen ja täyden passiivipaineen välillä kuvastaa kuvassa 10 esitetty kuvaaja. (RIL 263 2014)



Kuva 10. Kitkamaassa vaikuttavan passiivisen maanpaineen arvot lepopaineen ja täyden passiivisen maanpaineen välillä suhteessa seinän siirtymän ja täyteen passiiviseen maanpaineeseen vaadittavan siirtymän suhteen v/v_p .

2.4.3 Maanpaineen laskenta

Mikäli rakenne on siirtymätön, se mitoitetetaan lepopaineelle. Lepopaine on aina suurempi, kuin aktiivinen maanpaine ja mitoituslaskennassa oletetaan sen vaikuttavan seinään vaakasuoraan. Lepopaine p_0 lasketaan kaavan 1 mukaan (RIL 263 2014).

$$p_0 = \sigma_h = K_0 \left(\int_0^z \gamma dz + q - u \right) + u = K_0 [\sigma'_z(z) + q] + u, \quad (1)$$

jossa

K_0 on lepopainekerroin,

γ on maakerroksen vedellä kyllästynyt tilavuuspaino,

q on pintakuorma seinän takana

u on huokosvedenpaine

σ'_z on tehokas pystyjännitys syvyydessä z .

Lepopainekerroin voidaan laskea kaavasta 2. (RIL 263 2014)

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \sqrt{OCR}, \quad (2)$$

jossa

φ' on maan tehokas leikkauskestävyyskulma ja

OCR on maan ylikonsolidaatioaste.

Kaavaa ei tule käyttää erittäin korkeilla OCR-arvoilla.

Maanpinta seinän taustan puolella voi viettää myös seinästä ylöspäin kulmassa $\beta \leq \varphi'$ vaakatason suhteen. Tällöin maanpaineen vaakasuuntainen komponentti voidaan laskea lepopaine kertoimen korjatulla arvolla $K_{0,\beta}$ kaavan 3 mukaan. (RIL 263 2014)

$$K_{0,\beta} = K_0 (1 + \sin \beta). \quad (3)$$

Kun seinää ei tarvitse mitoittaa siirtymättömäksi, voidaan laskentaohjelmin määrittää aktiivipuolelle (kaatava voima) lepopaineen ja aktiivipaineen välinen arvo ja passiivipuolelle (tukeva voima) lepopaineen ja passiivipaineen välinen arvo, jotka riippuvat siirtymän suuruudesta. Aiemmin alaluvussa 2.2.2 on esitelty taulukkoarvoja siirtymistä, joita vaaditaan aktiivi- tai passiivipaineen täyteen mobilisoitumiseen, eli aktiivisen tai passiivisen rajatilan saavuttamiseksi.

Aktiivipaineen ääriarvo, eli aktiivisen rajatilan maanpaine lasketaan kaavasta 4 ja 5. (RIL 263 2014)

$$p_a = \sigma_a(z) = K_a \left(\int_0^z \gamma dz + q - u \right) + u - c K_{ac} \quad (4)$$

$$K_{ac} = 2 \sqrt{K_a \left(1 + \frac{a}{c} \right)}, \text{ tai alle } 2,56 \sqrt{K_a}. \quad (5)$$

Samalla seinän ja maan rajapintaan muodostuu leikkausjännitystä, joka voidaan laskea Mohr-Coulombin teoriasta johdatellen kaavan 6 mukaan. (RIL 263 2014) Leikkausjännitys on positiivinen alaspäin suuntautuvalla liikkeelle.

$$\tau_a(z) = \sigma_a(z) * \tan(\delta_a) + a. \quad (6)$$

Passiivipaineen ääriarvo, eli passiivisen rajatilan maanpaine lasketaan kaavojen 7 ja 8 mukaan. (RIL 263 2014)

$$p_p = \sigma_p(z) = K_p \left(\int_0^z \gamma dz + q - u \right) + u - cK_{pc}, \quad (7)$$

$$K_{pc} = 2 \sqrt{K_p(1 + a/c)}, \text{ tai alle } 2,56\sqrt{K_p}. \quad (8)$$

Passiivipuolelle muodostuva leikkausjännitys on aktiivipuolen leikkausjännityksestä poiketen positiivinen ylöspäin suuntautuvalla liikkeelle ja se voidaan laskea passiivipuolen vaakajännitystä käyttäen vastaavasti, kuin aktiivipuolen leikkausjännitys kaavan 10 mukaan. (RIL 263 2014)

$$\tau_p(z) = \sigma_p(z) * \tan(\delta_p) + a. \quad (9)$$

Yllä olevissa kaavoissa

a on seinän ja maan välissä vaikuttava adheesio,

c on maan koheesio,

K_a on vaakasuuntaisen tehokkaan aktiivisen maanpaineen kerroin,

K_p on vaakasuuntaisen tehokkaan passiivisen maanpaineen kerroin

q on pystysuuntainen pintakuorma

z on syvyys mitattuna seinän yläreunasta

β on maanpinnan kaltevuuskulma seinän taustalla (positiivinen ylöspäin)

δ_a, δ_p on leikkauskestävyyskulma maa-aineksen ja seinän rajapinnassa aktiivi- ja passiivipuolella

γ on maa-aineksen kokonaistilavuuspaino

σ_a(z) on kohtisuoraan seinän vastainen jännitys syvyydellä z aktiivisessa rajatilassa

$\sigma_p(z)$ on kohtisuoraan seinän vastainen jännitys syvyydellä z passiivisessa rajatilassa.

Maanpaineen laskenta edellä esiteltyillä yhtälöillä 1-10 voidaan tehdä sekä kokonaisjännitysten, että tehokkaiden jännitysten tarkasteluna. Mikäli maa on avoimissa olosuhteissa, laskennassa käytetään maan lujuuden tehokkaita parametreja, kitkakulmaa φ' ja koheesiota c' . Jos taas maan olotila on suljettu, käytetään lujuusparametrina suljettua leikkauslujuutta c_u ja maanpaineiden kertoimina $K_a = K_p = 1$. (RIL 263 2014)

Maanpaineen suuntaan ja suuruuteen vaikuttaa myös seinän ja maa-aineksen rajapinnassa vaikuttava leikkauskestävyys. Tukirakenteen ja maan välinen leikkauskestävyyskulma riippuu maan sisäisestä kitkakulmasta sekä tukirakenteen materiaalista. Karkearaeisissa maissa, joissa kitkakulma on suuri, seinän ja maan välinen kitka pienentää aktiivipainetta ja suurentaa passiivipainetta. Samalla paineiden suunta muuttuu siten, että aktiivipaine suuntautuu vinosti alaspäin ja passiivipaine ylöspäin. Hienorakeisissa tai eloperäistä ainesta sisältävissä maalajeissa maanpaineen oletetaan yleisesti vaikuttavan vaakasuunnassa. Taulukossa 4 on esitetty seinän ja maa-aineksen välisen leikkauskestävyyden arvoja riippuen tukiseinämateriaalista. (RIL 263 2014)

Taulukko 4. Seinän ja maa-aineksen välinen leikkauskestävyys seinämateriaalin perusteella (RIL 263 2014)

Tukiseinämateriaali	Seinän ja maa-aineksen välinen leikkauskestävyys	
	δ_a	δ_p
Betoni	$3/4 \varphi$	$1/2 \varphi$
Teräs	$2/3 \varphi$	$1/2 \varphi$

2.4.4 Vedenpaine

Pohjavedenpinnan alapuolella vedenpaine vaikuttaa jännityksiin ja tällöin maanpaineet lasketaan käyttäen maa-aineksen tehokasta tilavuuspainoa. Maan tehokas tilavuuspaino lasketaan kaavan 10 mukaisesti. (RIL 263 2014)

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w, \quad (10)$$

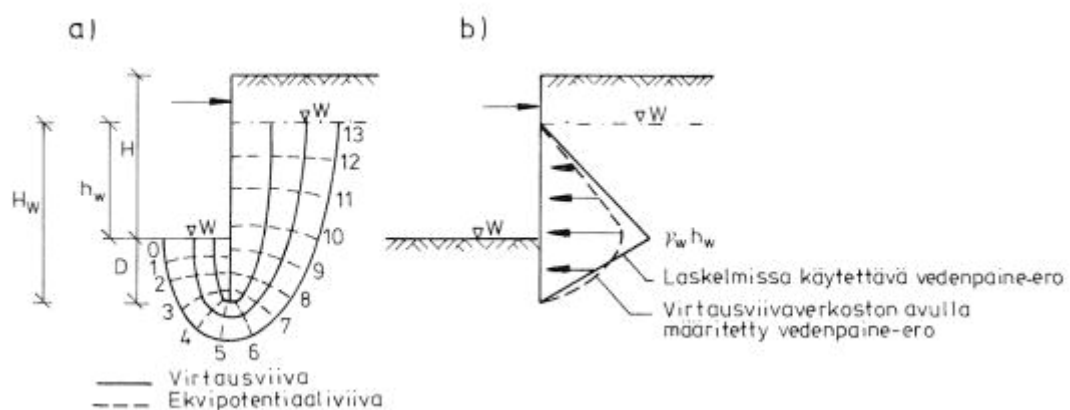
jossa

γ_{sat} on vedellä kyllästyneen maan tilavuuspaino ja

γ_w on veden tilavuuspaino ($\sim 10 \text{ kN/m}^3$)

Tilanteessa, jossa vedenpintojen korkeusero seinän eri puolilla on pieni, eikä vesi virtaa seinän alapuolelta, laskelmissa oletetaan tukiseinään kohdistuvan veden hydrostaattisesta paineesta aiheutuva paine-ero. Tällainen tilanne on esimerkiksi koheesiomaissa lyhytaikaisessa tilanteessa.

Jos taas virtausta pääsee tapahtumaan, vedenpaine-ero muuttuu seinän alaosassa. Virtaustilanteessa käytettävä vedenpaine-ero on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Virtaustilanteessa esiintyvä vedenpaine-ero. a) virtausviivaverkosto ja b) laskennassa käytettävä vedenpaine-ero.

Tällaisessa tilanteessa virtaava vesi vaikuttaa myös maan tehokkaaseen tilavuuspainoon, jonka johdosta myös hydraulisen murtuman mahdollisuutta on tarkasteltava. Pohjaveden virtaaman aiheuttama muutos voidaan laskea kaavojen 11 ja 12 mukaisesti. (RIL 263 2014)

$$\gamma'_a = \gamma' + i_a \gamma_w \quad (11)$$

$$\gamma'_p = \gamma' - i_p \gamma_w \quad (12)$$

jossa

γ'_a ja γ'_p ovat maan tehokkaat tilavuuspainot aktiivi- ja passiivipuolella ja

γ_w on veden tilavuuspaino.

Kaavoissa käytettävät hydrauliset gradientit i_a ja i_p lasketaan kaavojen 13 ja 14 mukaisesti. (RIL 263 2014)

$$i_a = \frac{0,7h_w}{H_w + \sqrt{H_w D}}. \quad (13)$$

$$i_p = \frac{0,7h_w}{D + \sqrt{H_w D}}. \quad (14)$$

Kaavoissa esiintyvät mitat on esitetty kuvassa 11.

Laskennassa käytettävät pohjavedenpintojen tasot tulee valita pinnanmuotojen, kairaus-ten sekä pohjavesiputkista saatavan tiedon mukaan. Huomioida tulee myöskin vuoden-ajasta riippuvat pohjavedenpinnan vaihtelut. (RIL 263 2014)

2.5 Tukiseinän rakenteellinen mitoitus

Tukiseinän momenttikestävyys ja siinä tapahtuvat siirtymät riippuvat seinän rakenteellisesta poikkileikkauksesta sekä materialista. Tukiseinälaskennassa maanpaineen aiheuttama kuorma on seinän etenemissuunnassa jatkuva, joten voidaan olettaa, että sen aiheuttama taivutusmomentti on kohtisuorassa seinään nähden. Tukiseinän rakenteellinen mitoitus perustuu alaluvussa 2.2 esiteltujen kuormien tukiseinään aiheuttaman laskennalliseen taivutusmomenttiin. Suurimman taivutusmomentin perusteella voidaan kaavan 15 mukaan tarkastella, onko tukiseinärakenteen poikkileikkauksen taivutusvastus riittävä, jotta taivutusmomentin aiheuttamat jännitykset eivät ylitä materiaalin sallittua jännitystä, kun leikkausvoimaa ei oteta huomioon. (Ou 2006)

$$W_{vaad} = \frac{M_{tz,max}}{f}, \quad (15)$$

jossa

W_{vaad} on poikkileikkaukselta vaadittava taivutusvastus,

M_{tz} on seinässä vaikuttava suurin taivutusmomentti ja

f on materiaalissa sallittu maksimijännitys.

Taivutusvastus kuvaa rakenteen poikkileikkauksen kykyä vastustaa veto- tai puristusjännitystä reuna-alueella, jossa poikkileikkauksen sisäiset jännitykset ovat suurimmillaan. Taivutusvastus määritetään kaavan 16 mukaan (Salmi & Kuula 2012)

$$W_z = \frac{y}{I_z}, \quad (16)$$

jossa

y on poikkileikkauksen reunapisteen kohtisuora etäisyys poikkileikkauksen pintakeskiöstä ja

I_z on poikkileikkauksen neliömomentti.

Neliömomentti, eli poikkileikkauksen toinen momentti seuraa kaavasta 17 (Salmi & Kuula 2012)

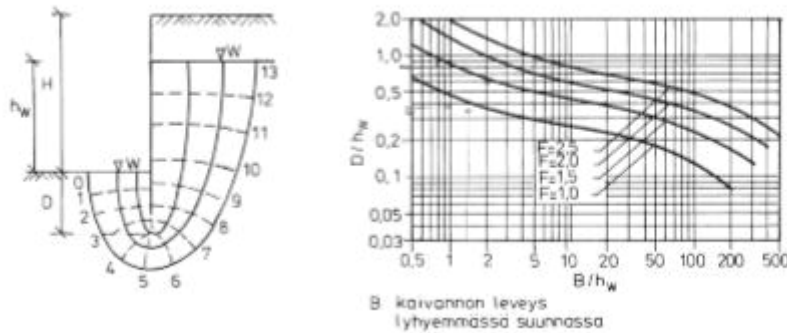
$$I_z = \iint y^2 dA. \quad (17)$$

Seinän taivutusvastus sekä -jäykkyys riippuvat siis seinän muodosta, mutta momentti-kestävyyteen vaikuttaa myös seinän materiaali.

2.6 Tukiseinän upotussyvyys ja pystysuuntainen stabiliteetti

Tukiseinän upotussyvyys määrittyy tavallisesti tukiseinän alapään pysyvyyden perusteella. Alapään pysyvyys määritetään voimien tasapainoehdon mukaan siten, että huomioon otetaan tukiseinään vaikuttavat aktiivipuolen kuormitukset sekä kaivannon tuennan aiheuttamat tukevat voimat. Näiden voimien perusteella määritetään momenttitehdolla passiivimaanpaineen arvo, joka vaaditaan, jotta tukiseinän alapää on stabiili. Tämä ei saa ylittää maa-aineksen kestävyyttä. Vaihtoehtoisesti olosuhteista riippuen määrittäviä tekijöitä voivat olla myös kaivannon pohjan vakavuus, eli kaivannon pohjannousu tai hydraulinen murtuman, kokonaisstabiliteetti tai tukiseinän kärkekantavuus.

Kaivannon pohjan varmuutta hydraulista murtumaa vastaan voidaan arvioida kuvan 12 kuvaajan perusteella. Lähtötietona tarvitaan kaivannon sisä- ja ulkopuolella olevien pohjavedenpintojen välistä korkeuseroa sekä kaivannon kaivussyvyyttä ja leveyttä. Näiden perusteella sekä vaaditulla varmuusluvulla voidaan määrittää tukiseinän ulotus kaivannon pohjan alapuolelle kaivussyvyyden funktiona. (RIL 263 2014)



Kuva 12. Kuvaajasta voidaan määrittää tukiseinän ulotussyvyys kaivussyvyyden funktiona. (RIL 263 2014)

Kun kaivanto rakennetaan karkearakeiseen pohjamaahan ja se on laaja-alainen, varmuus hydraulista murtumaa vastaan voidaan määrittää kaavan 18 mukaan. (RIL 263 2014)

$$F = \frac{\gamma'}{i_p \gamma_w}, \quad (18)$$

Hydraulisen gradientin i_p laskenta on esitetty alaluvussa 3.2.4.

Mikäli kaivannon alueella pohjamaa koostuu hienorakeisesta tai eloperäisestä materiaalista, voi tapahtua hydraulinen pohjannousu. Vaara pohjannousulle on erityisesti tilanteissa, joissa hyvin vettä johtavan kerroksen päällä on kerros hienorakeista tai eloperäistä maa-ainesta ja kaivannon kaivussyvyys ei ulotu vettä johtavaan kerrokseen. Varmuutta pohjan nousua vastaan voidaan arvioida kaavan 19 perusteella. (RIL 263 2014)

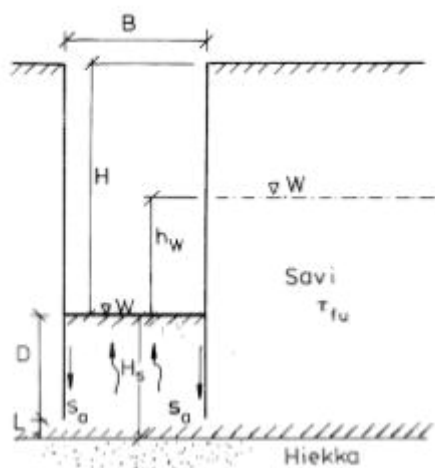
$$F = \frac{\gamma H_s + \frac{2\tau_{fu} L + s_a D}{B}}{\gamma_w (h_w + H_s)}, \quad (19)$$

jossa

τ_{fu} on saven leikkauslujuus ja

s_a on maa-aineksen ja seinän välissä vaikuttava adheesio.

Käytettävät mitat on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Mitat, joita käytetään kaavassa, jolla arvioidaan varmuutta pohjan nousua vastaan. (RIL 263 2014)

Kaivannon kokonaisstabiliteetti määritetään, jotta ympäristössä ei pääse kaivannon takia tapahtumaan sortumaa maa-aineksessa. Stabiliteettilaskennassa tutkitaan liukupinnan aktiivipuolella maanpainon aiheuttamaa kuormaa, joka pyrkii aiheuttamaan liukupinnassa tapahtuvan sortuman. Sortumaa vastustaa liukupinnan passiivipuolen maanpaine sekä maa-aineksen leikkauslujuus. Kun kaivanto kaivetaan auki, passiivipuolelta poistuu maa-ainesta ja täten sortumaa vastustava maanpaine pienenee, jolloin liukupinnan varmuus pienenee. Sortuma ei voi tapahtua tukiseinän läpi, jolloin tukiseinän upotussyvyyden kasvattaminen parantaa varmuutta sortumaa vastaan. Kaivannon kokonaisstabiliteetin menetys tulee usein kysymykseen tilanteissa, joissa tukiseinän taustalla on mäki ylöspäin, jolloin aktiivipuolella oleva kaatava voima on suuri.

Kaivannon pystystabiliteetti tarkoittaa käytännössä kaivannon alapäässä olevan maa-aineksen kykyä vastustaa pystysuuntaisia voimia, jotka vaikuttavat tukiseinään. Tätä nimitetään kärkekantavuudeksi. Pystysuuntaisia voimia voivat tukiseinään aiheuttaa tukiseinän omapaine, maanpaineen pystykomponentti, mikäli maanpaine ei ole vaakasuuntainen, sekä vinojen ankkurien aiheuttaman voiman pystykomponentti. Tämän johdosta vinoin ankkurein tuettu tukiseinä tulee tavallisesti ulottaa hienorakeisten maa-kerrosten alapuolelle. Tämä ehto kuitenkin toteutuu yleensä jo tukiseinän alapään pysyvyyden perusteella. (RIL 263 2014)

3. PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU JA PORAPAALUTUSTEKNIikka

3.1 Paalun määritelmä

Paalutusohje 2016:n mukaan (RIL 254-2016, s. 15) paalu tarkoittaa rakennetta, joka siirtää voimia maahan tai kallioon ja voi sisältää kuormaa siirtäviä elementtejä, jotka suoraan tai epäsuorasti siirtävät kuormia tai rajoittavat muodonmuutoksia.

Paalutyypit voidaan jakaa eri tavoilla eri kategorioihin. Kokonsa mukaan paalut jaetaan yleensä kahteen ryhmään, suur- ja pienpaaluihin, jolloin suurpaaluksi luokittelu edellyttää teräsbetonipaaluilla noin 500 mm halkaisijaa ja teräspuikipaaluilla noin 300 mm halkaisijaa. Eurooppalaisessa toteutusstandardeissa suurpaalut on jaettu kahteen pääryhmään asennustekniikan perusteella. Suurpaaluja koskee kaksi erillistä standardia, maata syrjäyttäviä paaluja toteutusstandardi SFS-EN 12699 ja maata syrjäyttämättömiä, eli kaivettavia paaluja, koskee standardi SFS-EN 1536. Pienpaaluille on oma standardinsa SFS-EN 14199.

3.2 Paaluperustuksen toiminnallinen suunnittelu

Maata syrjäyttävien ja kaivettavien paalujen välillä valinta tehdään yleensä ympäristön asettamien vaatimusten mukaan. Tärkeimpiä ympäristön asettamia vaatimuksia paalutyypille ovat: (RIL 254 2016) Tärkeimmät huomioitavat asiat paalutuksen toiminnallisessa suunnittelussa paalutusohjeen (RIL 254 2016) mukaan ovat maan häiriintyminen, huokospaineen nousu paalutuksen johdosta maaperässä, paineellinen pohjavesi, paalutuksen aiheuttama melu ja värinä sekä maan tiivistymisen tai löyhtymisen aiheuttamat ongelmat.

3.2.1 Maan häiriintyminen, huokospaineen nousu ja paineellinen pohjavesi

Kun paaluja asennetaan hienorakeisiin tai eloperäisiin maakerroksiin, voi aiheutua kyseisten maakerrosten häiriintymistä ja paalutusalueella huokosvedenpaineen nousua. Nämä aiheuttavat maakerroksen lujuusparametrien heikkenemistä ja seurauksena ympäristössä voi tapahtua painumia tai jopa stabiliteetin menetys. Tämän johdosta hyvin riskialttiita ovatkin kohteet, joissa on paineellista pohjavettä tai ne ovat stabiliteetiltaan etukäteen heikkoja, kuten jotkin vanhat ratapenkereet pehmeiköillä.

Maata syrjäyttävät paalut aiheuttavat suurempaa huokosvedenpaineen kasvua, mutta myös maata syrjäyttämättömät paalut voivat aiheuttaa ongelmia. Esimerkiksi porapaalun porauksen yhteydessä tehtävä huuhtelu voi aiheuttaa suuren paineen ympäröivään maahan, jolloin maa saattaa häiriintyä.

Kohteissa, joissa edellä mainitut riskit pätevät, on syytä tehdä ennakoivia toimenpiteitä, jotta ongelmilta välttyttäisiin, mutta paikoissa, joissa seuraamukset ovat suuret, voidaan huokosvedenpainetta ja siirtymiä seurata ympäristössä ennakkoon suunnitelluin mittauksin.

3.2.2 Maan tiivistyminen tai löyhtyminen

Maan tiivistyminen tai löyhtyminen on ongelma lyöntipaalujen asennuksen yhteydessä. Paalutusalueella olevat löyhät kitkamaakerrokset kitkamaakerrokset voivat tiivistyessään aiheuttaa painumia lähistössä oleville maanvaraisille tai kitkapaaluille perustetuille rakenteille. Tiiviiden maakerrosten löyhentyminen voi aiheuttaa ympäröiville paaluperustusten paaluille negatiivista vaippahankausta ja täten pahimmassa tapauksessa ylittää paalujen rakenteellisen vetokestävyyden.

Porapaalujen asentaminen voi aiheuttaa maan löyhtymistä, mikäli paalun tilavuus on pienempi kuin poistetun maa-aineksen tilavuus, eli jos avarrinkruunu on suurempi, kuin paalu.

3.2.3 Tärinä ja melu

Paalujen asentaminen aiheuttaa poikkeuksetta jonkinlaista tärinää ja melua ympäristössä (paalutusohje). Tärinä tarkoittaa asennuksen aiheuttamien erilaisten aaltotyyppien, niiden heijastusten ja taittumisten aiheuttamaa maan liikehdintää ja sen voimakkuus ja eteneminen riippuvat voimakkaasti maaperän ominaisuuksista. Tärinän voimakkuus riippuu myös asennustavasta. Lyömällä asennettava paalu aiheuttaa ympäristöön huomattavasti voimakkaampaa tärinää asennettaessa verrattuna porattuun paaluun. Kaikista pienimmän tärinän aiheuttaa puristamalla asennettava paalu, jollaista voidaan käyttää olosuhteissa, joissa maaperäolosuhteet tärinän etenemiselle ovat otolliset ja ympäristöön ei saa aiheutua merkittävää tärinää. (Leppänen 2008)

Melu on ilmassa etenevää aaltoliikettä, jonka vastaanottaja aistii äänenä ja liiallisella intensiteetillä voi kokea sen epämukavana. Paalutuksen yhteydessä melu aiheuttaa ongelmia varsinkin yönaikaisissa paalutuksissa asuinrakennusten läheisyydessä, mutta myös päiväsaikaan on paalutuskohteita, joissa melu ei saa olla liiallista, kuten päiväkotien läheisyydessä. Rakennuskohteissa sallittu melutaso valitaan yleensä hankekohtaisesti, mikäli ympäristössä on toimintaa, joka rajoittamista vaatii. Muulloin sallittu meluraja on $L_{Abq} = 80$ dB. Paalutusohjeen mukaan laskentamenetelmiä melutasolle ei ole, joten melua tulee mitata työn aikana. Paalutustavoista lyöntipaalutus aiheuttaa eniten

melua, joskin porapaalutuksesta ja täryttämisestä aiheutuva melu on taajuudeltaan suurempaa, joten se voi olla ongelmallisempaa pienemmälläkin intensiteetillä. (RIL 254-2016)

3.2.4 Muut rajoittavat tekijät

Paalutyyppejä valitessa tulee myös ottaa huomioon mm. pohjamaa sekä paaluille aiheutuvien kuormien suuruus. Asennustila on myös tärkeä ominaisuus paalutyypin valinnassa. Mikäli asennus tehdään hyvin pienessä tilassa, mutta paalujen tulee ulottua syvällä maanpinnan alapuolelle, joudutaan paaluja jatkamaan. Tämä ei esimerkiksi betonisilla lyöntipaaluilla onnistu.

3.3 Porapaalutyypit ja asennustekniikka

3.3.1 Yleistä porapaaluista

Porapaalun käyttö tulee aiheelliseksi erityisesti rakennuskohteissa, joissa muilla paalutustekniikoilla ei pystytä läpäisemään maakerroksia tai läpäiseminen on epävarmaa. Tällaisia ovat esimerkiksi sekalaiset täyttömaat, kiviset tai lohkaraiset maalajit sekä rakennuspaikat, joissa on vanhoja perustusrakenteita, jotka tulee läpäistä. Paikoissa, joissa kalliopinta viettää voimakkaasti, voidaan porapaalut porata kallioon asti, jolloin kalliota vasten liukumista ei pääse tapahtumaan. Porapaaluilla pystytään saavuttamaan varmasti tietty tunkeutumistaso, jolloin suunnitteluratkaisua pystytään noudattamaan todennäköisemmin, kuin muilla paalutustekniikoilla. Tämä on hyödyllinen ominaisuus esimerkiksi, jos työ on hyvin kiireellinen, eikä aikaa suunnitelmien korjaamiseen ole rakentamisen aikana. (SSAB 2017)

Porapaaluilla voidaan saavuttaa hyvä sijainti- ja kaltevuustarkkuus, jolloin suunnittelussa voidaan hyödyntää paalujen kapasiteettia paremmin. Suomessa tehtävät porapaalut porataan tavallisesti kallioon asti ulottuviksi, jolloin paalujen materiaaliominaisuudet pystytään hyödyntämään tehokkaimmin. (RIL 254-2016)

Suomessa käytettäviä porapaalutyyppejä on neljä kappaletta, läpi-injektoitava porapaalu, terässydänpaalu sekä porattava teräsputkipaalu, jonka porausputki nostetaan ylös tai jätetään paalun osaksi. (RIL 254-2016) Tässä työssä käsitellään vain porattavaa teräsputkipaaluja, jossa porausputki jää paalun osaksi, sillä se on yleisin paalutustekniikka ja CT-paalu on kyseisen tyyppinen paalu.

Suomessa käytettävä paalujen poraustekniikka on iskevä porapaalutus. Iskevän porauskaluston toiminnallisuus perustuu neljään parametriin, pyörikyseen, huuhteluun, iskuun ja syöttövoimaan. Paalutuksessa käytettävät pääosat ovat itse porauskalusto, paalutuksen suojaputki, poraustanko, suojaputkessa (paalussa) kiinni oleva maakenkä, avarrinkruunu sekä pilottikruunu. (RIL 254-2016)

3.3.2 Porauskalusto

Porauskalustoa valitessa voidaan valita, käytetäänkö päältä lyövä- vai uppoporauskalustoa. Molemmilla kalustoilla voidaan porata sekä epäkeskisellä, että keskisellä porausmekaniikalla (kts. alaluku 3.2.2.).

Päältä lyövä porauskalusto

Paalun yläpäästä lyövällä vasaralla varustettua kalustoa kutsutaan päältä lyöväksi. Päältä lyövän kaluston vasara on tavallisesti hydraulinen tai pneumaattinen vasara. Päältä lyövällä kalustolla voidaan tavallisesti porata vain korkeintaan 200 mm halkaisijaltaan olevaa paalua, eli kalusto käy vain mikropaalujen asentamiseen. Päältä lyövässä kalustossa vasara lyö paalun yläpuolella poraustankoa, joka on paalun sisällä. Poraustanko välittää iskun paalun alapäähän avarrinkruunulle ja pilottikruunulle. Päältä lyövässä porauskalustossa ongelmallista on voiman välitys, sillä iskun voima heikentyy, mitä pidempi poraustanko on. Tästä johtuen perinteisesti päältä lyövällä kalustolla voidaan porata korkeintaan 30 m pitkiä paaluja, pois lukien tilanteet, joissa porataan erittäin pehmeään saveen, jolloin voidaan päästä jopa 50 metrin syvyydelle. (RIL 254-2016) Esimerkki päältä lyövästä kalustosta on kuvassa 14.



Kuva 14. Päältä lyövässä kalustossa isku avarrin- sekä pilottikruunulle välittyy porauskalustosta maanpinnalta poraustankojen välityksellä. Kuvasta puuttuu vasara. (Laitinen 2017)

Uppoporauskalusto

Uppoporauskalustossa porausvasara on paalun alapäässä ja iskee suoraan pilottikruunuun. Uppoporauskalustoa käyttäessä voidaan paalut porata syvemmälle, kuin päältä lyöväällä kalustolla, jonka lisäksi paaluista tulee tavallisesti suorempia ja tunkeutumisnopeus on tasaisempi. Tällä hetkellä suurimmat uppokalustolla porattavat paalut ovat halkaisijaltaan noin 1200 mm. (Viitala 2016) Esimerkki uppoporauskalustosta on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Uppoporauskalustossa vasara lyö suoraan kuvassa näkyvää pilottikruunua. Kuvasta puuttuu vasara. (Laitinen 2017)

3.3.3 Porausmenetelmä

Porausmenetelmäksi voidaan valita joko keskeinen tai epäkeskeinen porausmenetelmä.

Keskeinen porausmenetelmä

Keskisessä porausmenetelmässä avarrinkruunu on symmetrinen suhteessa pilottikruunuun. Menetelmässä vasaran (päältä lyövässä menetelmässä poratankojen kautta) lyönin voima välittyy avarrinkruunuun suoraan pilottikruunusta ja paaluun maakengän kautta. Maakenkä on hitsaten kiinnitetty paaluun, jota se vetää pilottikruunun edessä. (RIL 254-2016)

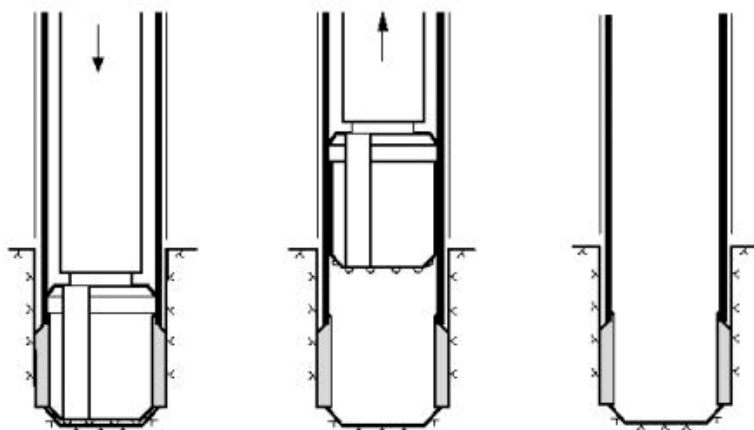
Avarrinkruunu voi olla joko siipiteräinen tai rengasteräinen malli. Siipiavartimet on kiinnitetty suoraan pilottikruunuun ja rengasteräinen voi olla kiinnitetty paaluun maa-

kengällä tai se voi toimia irrallisena vain pilottiterään kytkettynä porauksen aikana. (RIL 254-2016) Siipiterällinen avarrinkruunu on esitetty kuvassa 16 ja rengasterällinen kuvissa 14 ja 15.



Kuva 16. Siipiterällisessä avarrinkruunussa terä on kiinnitetty pilottikruunuun.
(Laitinen 2017)

Käyttäessä keskisessä porausmenetelmässä rengasterällistä avarrinkruunua, avarrinkruunu jää maahan paalun alle, kun taas siipiterää käytettäessä, saadaan avartimet käännettyä pilottiterän sisään ja terä nostettua kokonaisuudessaan ylös uusiokäyttöä varten. Rengasteränä voidaan käyttää joko normaalikoon rengasterää, eli halkaisijaltaan samaa, kuin paaluputki tai ylikoon rengasterää, jolloin rengasterä on halkaisijaltaan suurempi, kuin paaluputki. Ylikoon rengasterää käytetään esimerkiksi porapaaluseinää poratessa, sillä uros- ja naarasponnit ulkonevat paaluputken halkaisijasta. (RIL 254-2016) Kuvassa 17 on havainnollistettu keskistä porausmenetelmää käyttäessä avarrinkruunua, jossa on rengasterä.

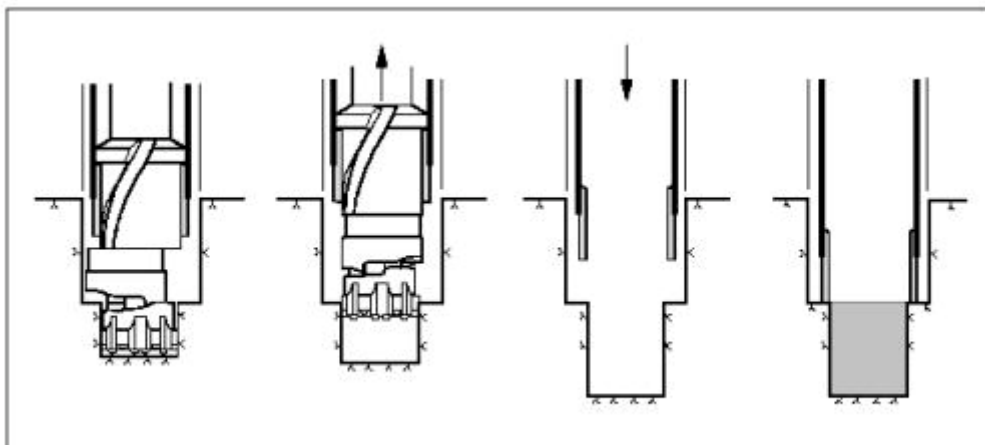


Kuva 17. Keskisen porauksen periaate. (Pålkomissionen 2010)

Keskisen porausmenetelmän etuja ovat pienemmät sijaintipoikkeamat, poraussuorituksen nopeus ja helppous sekä suuremmat paalukoot, kuin epäkeskisellä menetelmällä. Käytettäessä siipiterällistä avarrinkruunua, etuna on pienempi materiaalihävikki, kuin rengasterällisellä versiolla, joskin rengasterää käytettäessä pilottikruunun kuluma on pienempi.

Epäkeskinen porausmenetelmä

Epäkeskisessä porausmenetelmässä avarrinkruunu on kiinnitetty pilottikruunuun ja se on pilottikruunuun nähden epäsymmetrinen. Epäkeskinen poraus eroaa keskisestä porausmenetelmästä lähinnä avarrinkruunun osalta. Huonoina puolina verrattuna keskiseen porausmenetelmään on se, että porauksessa tapahtuvat sijaintipoikkeamat ovat suuremmat, eikä epäkeskinen avarrinkruunu tavallisesti kestä suomalaista kalliota. (RIL 254-2016) Epäkeskisellä porausmenetelmällä porattujen paalujen mitoituksessa on huomioitava, että paaluputki jää kalliohyllyn päälle, kuten kuvasta 18 voidaan havaita.



Kuva 18. Epäkeskisen porausmenetelmän periaate. Epäkeskisessä menetelmässä paaluputki jää kalliohyllyn päälle. (Pålkomissionen 2010)

3.3.4 Huuhtelu

Huuhtelu tarkoittaa paalua poratessa pilottikruunun syöttörei'istä syötettyä paineistettua ilmaa tai nestettä, jonka tarkoitus on kuljettaa porattu aines ylös putkea pitkin pois porauskalustosta ja uppovasarakalustoa käytettäessä käyttää vasaran mäntää. Huuhtelu tehdään tavallisesti joko ilmalla, vedellä tai sementillä. Käytettäessä sementtiä huuhteluaineena, sementti muodostaa paaluputken ulkopinnalle kuivuessa betonikerroksen, joka parantaa paalun lujuusominaisuuksia, sekä porapaaluseinän ollessa kyseessä paaluseinän vesitiiviyttä. Sementtihuuhtelua ei käytetä tavallisesti uppoporauskaluston yhteydessä.

3.4 Paaluperustuksen mitoitus

Paalujen mitoitus voidaan jakaa kahteen osioon, paalun geotekniseen ja rakenteelliseen mitoitukseen. Paaluperustuksen mitoitukseen kuuluu tarkasteltavana seuraavat mitoitusrajatilat (RIL 254-2016):

- alueellinen kokonaisvakavuuden menetys
- paaluperustuksen kantokestävyyden ylittyminen
- paaluperustuksen vetokestävyyden ylittyminen
- paaluperustuksen nousu
- paaluperustuksen poikittaisen kuormituksen aiheuttama maapohjan murtuminen
- paalun rakenteen murtuminen puristuksesta, vedosta, taivutuksesta tai leikkausrasituksesta
- paalun nurjahtaminen
- paaluperustuksen ja maapohjan yhdistetty murtuminen

- siirtymät: liian suuret painumat, liian suuri nousu, liian suuri poikittaissuuntainen liike

Näiden lisäksi tulee hankekohtaisesti ottaa huomioon esimerkiksi paalutuksen aiheuttamat haitalliset värinät tai muutokset huokosvedenpaineeseen ja ympäristössä tapahtuvat siirtymät.

4. CT-PORAPAAALUSEINÄN SOVELLUSKOHTEET JA NIIDEN ASETTAMAT VAATIMUKSET

4.1 Pysyvä tai väliaikainen tukiseinä

Perinteinen tapa käyttää porapaaaluseinää on kaivannon tukiseinä, joko pysyvä tai väliaikaisena. Tukiseinän toiminnallista suunnittelua ja mitoitusta on käsitelty luvussa 2. Kuten luvussa mainittiin, verrattuna toiseen porapaaaluseinävaihtoehtoon, RD-porapaaaluseinään, CT-porapaaalujen halkaisijavalikoima koostuu pienemmän halkaisijan paaluista. Tästä syystä CT-porapaaalujen taivutusjäykkyysväli on pienempi, kuin RD-porapaaalujen sekä tavallisesti käytettyjen ponttiseinien. Sille optimaaliset kaivannot ovat siis kaivussyvyydeltään hieman matalampia, kuin edellä mainittujen. Johtuen ponttiseinän asennustekniikasta, se on monesti myös matalammissa kaivannoissa optimaalinen valinta taloudellisesti, joten käytännössä, jotta CT-porapaaalu valitaan kaivannon tuentatavaksi, vaaditaan erityisolosuhteita, kuten maaperää, johon ponttiseinää ei saada upotettua tarpeeksi syvälle tai korkeampaa sijaintitarkkuuden vaatimusta.

CT-porapaaalun avoimen lukkoprofiilin takia tukiseinästä voidaan tehdä käytännössä halutun muotoinen, jolloin se on vaikeissa maaperäolosuhteissa hyvä valinta kaivantoihin, joissa halutaan optimoida kaivannon muotoa. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi vedenpumppaamojen kaivannot, joihin sijoitettava pumppaamo on lieriön muotoinen. Tällaiset kohteet sijaitsevat myös usein kaupunkiympäristössä, jolloin on tarve korkeammalle sijaintitarkkuudelle.

Mikäli käyttökohteena toimiva kaivanto on väliaikainen, voidaan porapaaalut nostaa ylös kaivannon täytön jälkeen ja uusiokäyttää. Uusiokäyttö vähentää materiaalihävikkiä sekä paalun että paalussa kiinni olevan avarrinkruunun osalta.

4.2 Lämpöä eristävä seinä

Teräspaaluja voidaan käyttää perustuksessa kuormaa vastaanottavan rakenteen lisäksi energiapaaluina, jolloin teräspaalun sisälle asennetaan U-muotoinen putki, jonka sisällä on nestettä, tyypillisesti vesi-etanoliseosta (Lehtonen 2013). Putket ulottuvat paalun pohjalle, jolloin nestettä voidaan kierrättää syvällä maanpinnan alla, jossa talvella vallitseva lämpötila on suurempi ja kesällä pienempi, kuin maanpinnalla. Tällä tavalla voidaan siirtää lämpöenergiaa nesteen välityksellä maanpinnalta maanpinnan alapuolelle ja toisinpäin.

Suomessa vallitsevan ilmaston johdosta lämpötilaerot ovat suuret vuodenaikojen välillä, jonka takia Suomessa maa-aineksesta saatu lämpöenergiapotentiaali on huomattavasti pienempi, kuin esimerkiksi eteläisemmässä Euroopassa. Lämpötilavaihtelua voidaan tasata lämpöä eristävällä seinällä, joka voi muodostua esimerkiksi porapaaluseinästä, joka eristetään käyttämällä injektointisementtiä huuhtelussa (Cervera et. al. 2014).

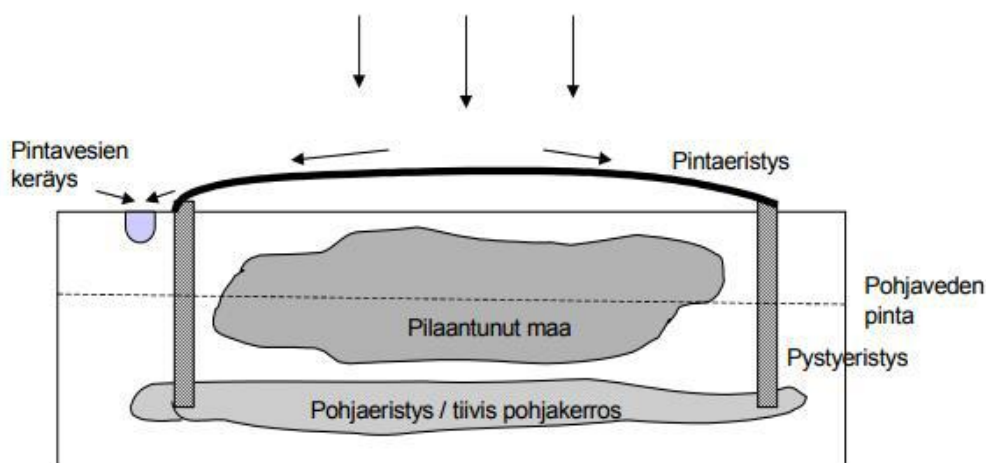
Lämpöä eristävän porapaaluseinän tärkein ominaisuus on lämmöneristävyys, johon vaikuttaa eniten huuhtelussa käytetty injektointisementti. Tästä syystä porapaaluseinän paaluilta ei sikäli vaadita suurta taivutusjäykkyyttä, vaan paalujen tulee olla mahdollisimman taloudellisia asennustekniikaltaan.

Aalto-yliopiston tekemässä tutkimuksessa mallinnettiin lämpöä eristävän porapaaluseinän vaikutuksia maa-aineksen lämpötilaan. Tutkimuksessa mallinnettiin viiden metrin syvyinen porapaaluseinä, jonka halkaisija oli 200 mm. Rakennus oli perustettu 40 metrin mittaisen kallioon tukeutuvien paalujen varaan, joita käytettiin maalämpöpaaluina. Pitkien paalujen lisäksi paalujen välissä oli lyhyitä 15 metrin mittaisia paaluja, joita käytettiin kesäaikaan auringosta aiheutuvan lämpöenergian siirtämiseksi maa-ainekseen. Tulosten perusteella seinän vaikutus pienenee etäisyyden seinään kasvaessa, vaikutuksen ollessa 15 metrin etäisyydellä olematon. Mallinnuksessa havainnoitiin myös lämpötilaeroja lähellä seinää, seinän eri puolilla. Näiden havaintojen perusteella lämpötilaerot eri puolilla seinää pienenevät syvyyden funktiona, erojen vaihdellessa välillä 5-10 °C. Lämpötilaero ilman eristystä ja eristykseen kanssa seinän läheisyydessä maanpinnalla vaihteli välillä 1,5-3,0 °C. Mallin perusteella lämpötilahäviö rakennuksen lattian läpi pieneni 1,0-2,5 kWh/m³, joskin lämpöhäviö on hyvin riippuvainen maa-aineksen lämpöominaisuuksista. (Cervera et. al 2014)

4.3 Pilaantuneiden maiden eristysrakenteet

Pilaantunut maa (PIMA) on maa-ainesta, joka on saastunut esimerkiksi raskasmetalleilla tai asbestilla, jotka voivat liueta veteen ja saastuttaa pohjavettä, jota käytetään esimerkiksi juomavetenä. Ensisijainen menetelmä pilaantuneiden maiden korjaamiseksi on yleensä pilaantuneiden maiden poistaminen ja puhdistaminen. Kuitenkin joissain tapauksissa maa on pilaantunutta niin suurelta alueelta, että sitä ei ole kannattavaa poistaa ja käsitellä, vaan taloudellisempaa on eristää se pohjavedestä. (Penttinen 2001)

Pilaantuneiden maiden eristämisen menetelmä perustuu koko maa-aineksen eristämiseen joka puolelta siten, että vesi ei pääse virtaamaan sen läpi. Alue eristetään pinnasta esimerkiksi asfaltoimalla, jotta sadevesi ei pääse suotautumaan maa-ainekseen. Pohjasta ja sivuista maa-aines eristetään, jotta pohjavesi ei pääse virtaamaan sen lävitse. (Penttinen 2001) Eristämisen periaate on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Pilaantuneen maan eristämisen periaate. (Penttinen 2001, alkuperäinen lähde Jeltsch 1990)

Pystyeristykseenä voidaan käyttää esimerkiksi porapaaluseinää. Menetelmässä täytyy huomioida, että pilaantunutta maata ei poisteta, joten pystyeristyksen tulee olla tiivis ja käytännössä ikuinen. Pohjavedenpinta voi olla eri puolilla seinää eri korkeustasolla, joten vedenpintojen välille voi muodostua paine-ero.

4.4 Lisärakentaminen maanpinnan alapuolelle rakennetussa ympäristössä

Kaupunkiympäristöt ovat nykyään tiheästi rakennettuja, jolloin pyritään siirtämään tiettyjä palveluita maanpinnan alapuolelle viemästä tilaa potentiaalisilta asuin- tai toimitiloilta. Tällaisia palveluita ovat esimerkiksi pysäköinti tai varastointi. Syvän kaivannon rakentamiselle on harvoin tilaa riittävästi luiskaamiselle, kun rakennetussa ympäristössä rakennetaan maan alle. Tällöin joudutaan turvautumaan kaivannon tuentaan. Vaikka luiskaamiselle olisikin tilaa, monesti tarpeen tuennalle aiheuttavat ympärillä olevien rakennusten perustukset tai pohjavesi.

Rakennetussa ympäristössä pohjaolosuhteet voivat vaihdella paljon ja luonnollisen pohjamaan päällä voi olla epämääräisiä vaikeasti läpäistäviä täyttöjä. Tällaisissa haastavissa olosuhteissa kaivannon tuentatavan valintaperusteiksi muodostuu monesti asennusvarmuus, eli tässä tapauksessa maakerrosten läpäisevyys, riittävä vedenpitävyys, ettei ympärillä oleville rakennuksille ja infralle aiheuteta painumia. Toinen valintaperuste on taivutusjäykkyys, jotta siirtymät pysyvät sallituissa rajoissa. Tällöin porapaaluseinä voi olla ainoa vaihtoehto, jolla saavutetaan kaikki ympäristön asettamat vaatimukset sekä riittävä kaivannon turvallisuus.

Tällaisissa tapauksissa kaivannon tuentaan käytettyä tukiseinää voidaan käyttää myös lopullisen rakenteen perustuksena, jos tukiseinällä on kapasiteettia kantaa rakenteista aiheutuva kuorma.

Johtuen CT-porapaaluseinän koosta ja tämän takia verrattain pienestä taivutusjäykkyydestä, käyttökohteina pääsääntöisesti toimivat matalat kaivannot. Matalat tuetut kaivannot tuetaan usein ponttiseinin johtuen sen kustannustehokkuudesta, mutta mikäli olosuhteet ovat sellaiset, että ponttiseinää ei saada upotettua riittävään syvyyteen, voi porapaaluseinä tulla kyseeseen. Luvussa 6.4. on käsitelty esimerkkinä tällaista kaivantoa. Vaihtoehtoisesti porapaaluseinää käytetään usein, jos tukiseinän sijainnin tulee olla hyvin tarkka.

4.5 Satamarakentaminen

Satamarakentamisessa tukiseiniä käytetään laiturin ja veden rajapinnassa, jossa laiturin alle tarvitaan rakenteita, mutta laiturin taustalla vaatimuksena on riittävä vedensyvyys. Tällaisessa tapauksessa tukiseinää kaatava voima on laiturin alapuolella olevan maan aineksen aiheuttama maanpaine ja tukevana laiturin taustalla oleva vedenpaine. Tukiseinän mitoituksessa tulee myös huomioida, erityisesti meren ollessa kyseessä, korrosio, jonka suolainen vesi aiheuttaa. Vaihtoehtoisesti laituri voidaan myös perustaa paalujen varaan vedenpinnan yläpuolelle.

Satamalaitureiden geotekninen suunnittelu tehdään tavanomaisen tukiseinän tapaan, mutta kuormat määrittyvät eri tavalla. Satamalaiturin tukiseinässä vaikuttava veden- ja maanpaine määrittyvät sataman syväyksen mukaan. Lisäksi tukiseinään kohdistuu kuormia jään ja veden vaikutuksesta, sataman liikenteestä aiheutuva liikennekuorma sekä satamassa tarvittavilta laitteilta, kuten nostureilta aiheutuvat kuormat. Poikkeuksen tavallisiin tukiseiniin aiheuttaa myös onnettomuuskuormat, eli törmäyksen aiheuttama voima. (RIL 201-3-2013) Tavallisesti satamissa tarvitaan korkeaa asennustarkkuutta, jolloin käytetään porapaaluseinää tai combi-seinää.

4.6 Tukiseinä lopullisena kantavana rakenteena

Mikäli tarvittavaan kaivantoon aiotaan myös tehdä rakenteita, joista aiheutuu lisäkuormia maapohjalle, mutta kaivannon kaivutason alapuolelle jää hienojakoisia tai eloperäisiä maakerroksia, jotka ovat esimerkiksi alttiita painumille, voidaan tukiseinää käyttää lopullisen rakenteen perustuksena. Tällöin tukiseinään kohdistuu rakenteesta pystysuuntaisia kuormia sekä maanpaineen aiheuttama vaakasuuntainen kuorma, eli seinän momenttikestävyys lisäksi mitoittavaksi perusteeiksi muodostuvat myös paalun mitoituksessa käytettävät rajatilat.

Porapaaluja käytettäessä paalujen alapään taso on yleensä kalliossa, jolloin kärkikantavuus tai stabiliteetti ja hydraulinen murtuma muodostuvat harvoin ongelmaksi. Tällöin

paalun murtuma tai nurjahdus ovat yleensä mitoittavat rajatilat. Johtuen suurista pystysuuntaisista voimista, kaivantotuella on järkevää suunnitella vaakatuennat, sillä paalun nurjahduskestävyys on pienempi, kun pystykuorma on epäkeskeinen.

Tällaisessa tilanteessa porapaalu on monesti kilpailukykyinen, sillä paalut ulotetaan syvällä oleviin maakerroksiin, joihin lyöntipaaluja ei saada lyötyä. Vaihtoehtoinen tapa toteuttaa rakenne on tukea kaivanto erikseen ja tehdä paaluperustus kaivannon sisälle.

Rakenne tulee kyseeseen tilanteissa, joissa rakennuksen rakenteet ulottuvat maanpinnan alapuolelle, jolloin kaivannon tuentaa tarvitaan esimerkiksi ympäröivien rakenteiden painumien takia tai kaivuunmassojen pienentämiseksi verrattuna luiskausvaihtoehtoon. Muita tukiseinätyyppejä, jotka mahdollistavat tällaisen rakenteen toteutuksen ovat suihkuinjektoitu seinä, patoseinät sekä muut porapaaluseinät. Muut käytettävät ratkaisut ovat hyvin järeitä, jolloin CT-porapaaluseinä soveltuu paremmin käytettäväksi kevyissä rakenteissa.

4.7 Suuret liittorakenteet CT-paaluista

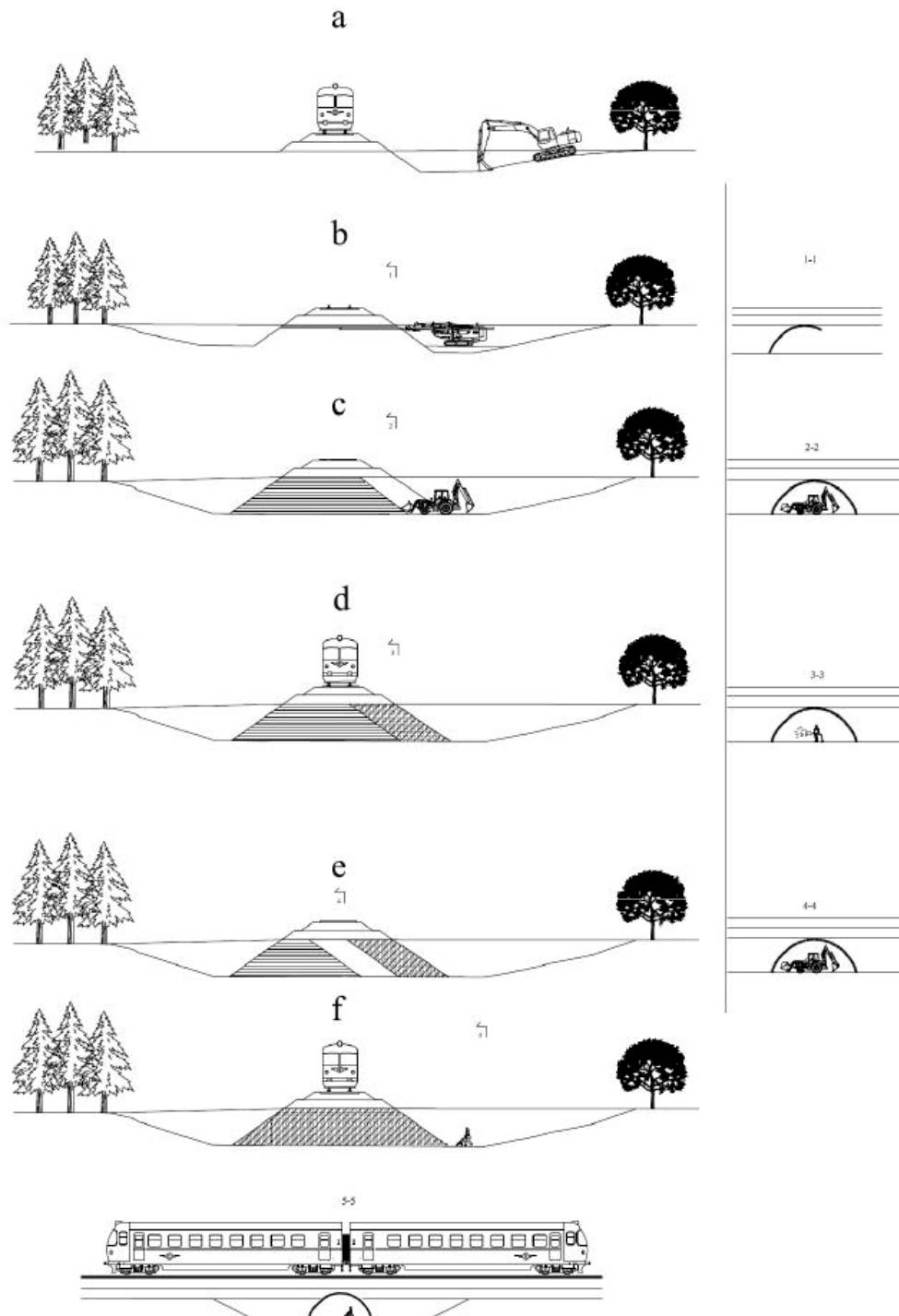
Turun ammattikorkeakoulun opiskelijat haastettiin opintojensa yhteydessä innovoimaan potentiaalisia käyttökohteita CT-porapaaluille. Innovoinnin tuloksena kaksi potentiaalista käyttökohdetta raportoitiin (Lehtonen et. al. 2014), jotka olivat CT-porapaaluseinän käyttö tunnelirakentamisessa sekä suurpaaluperustus useasta CT-paalusta eli ns. ”monopile”-perustus.

4.7.1 CT-porapaalu tunnelirakentamisessa

Hyödyntäen vaakaporaustekniikkaa sekä CT-porapaalun rakenteen mahdollistamaa porapaaluseinän vapaata muotoa, voidaan muodostaa holvirakenne, joka kannattelee yläpuolella olevan maanpaineen kuorman aiheuttamaa pystykomponenttia sekä sivulta aiheutuvaa maanpaineen vaakakomponenttia. Holvirakenteen periaate on kuormien siirtäminen ns. ”holvautumisen” avulla pystykuormina perustuksille. Rakenteen työtavan sekä tekniikan periaate on esitetty kuvassa 20. Esimerkissä tunnelin kaivu suoritetaan vaiheissa, paalujen porauksessa käytetään sementtihuuhdetta, joka vahvistaa rakenteen ja lopuksi rakenne vahvistetaan ruiskubetonilla. Tällaisen rakenteen suurimpana etuna voidaan pitää sitä, että tunneli voidaan rakentaa häiritsemättä sen yläpuolista toimintaa. Tällöin esimerkiksi ratojen tai teiden alle rakennettavien alitusten takia ei tarvitsisi katkaista liikennettä.

Rakenteellisen suunnittelun lisäksi väylän alittavan holvirakenteen suunnittelussa huomioon otettavia seikkoja ovat alitettavan väylän aleneva stabiilitetti alituksen kohdalla tehtävän kaivun takia, radan yhteydessä radan turva-alueet sekä holvirakenteen perustaminen. Stabiilitetti muodostuu ongelmaksi erityisesti paikoissa, joissa väylä on perustettu leikkauslujuudeltaan heikon maa-aineksen, kuten saven varaan. Tunnelin yläpuoli-

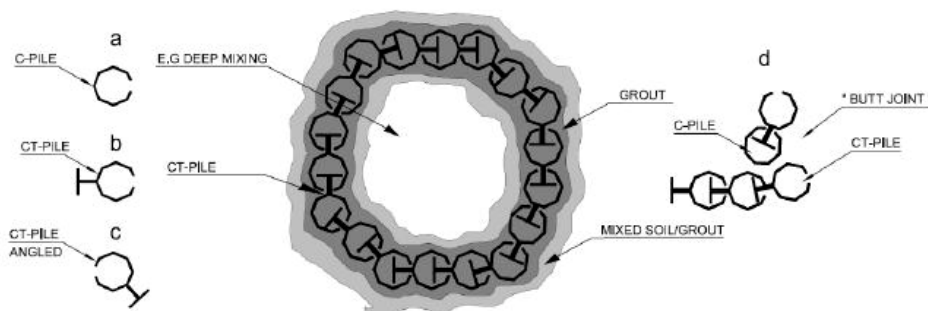
sen maa-aineksen aiheuttama paino koko rakenteeseen riippuu tunnelin suuruudesta, mutta joka tapauksessa se on verrattain suuri, jolloin holvirakenteen perustuksille tulee suuri kuormitus, joka voi aiheuttaa painumia tai stabiliteettiongelmia. Lisäksi perustuksen rakentamisen työtapaa ei olla kehitetty. Rata-alueella toimiessa rakennuskoneet tai työntekijät eivät saa olla Liikenneviraston Ratateknisten ohjeiden (RATO) osassa 2 esitettyssä avoimen tilan ulottuman sisällä (ATU). ATU ulottuu yhden metrin radan alapuolelle, mutta radan rakennekerrokset ovat tavallisesti tätä paksummat, joten se ei aiheuta rajoituksia rakentamiselle. Kuitenkin paalujen porauskaluston tulee myös pysyä ATUn ulkopuolella radan yläpuolellakin. (RATO 2 2010)



Kuva 20. Tunnelialikulun toteutus käyttäen CT-paaluista muodostuvaa holviraken-
netta. (Lehtonen et. al. 2014, alkuperäinen lähde Hautamäki 2014)

4.7.2 Suurpaaluperustus useasta CT-paalusta

Suurpaaluperustus useasta CT-paalusta tarkoittaa käytännössä porapaaluseinää, joka rakennetaan haluttuun paalun muotoon, jolloin porapaalut muodostavat yhden yksittäisen paalun. Tällainen useasta paalusta muodostuva paalu on esitelty kuvassa 21.



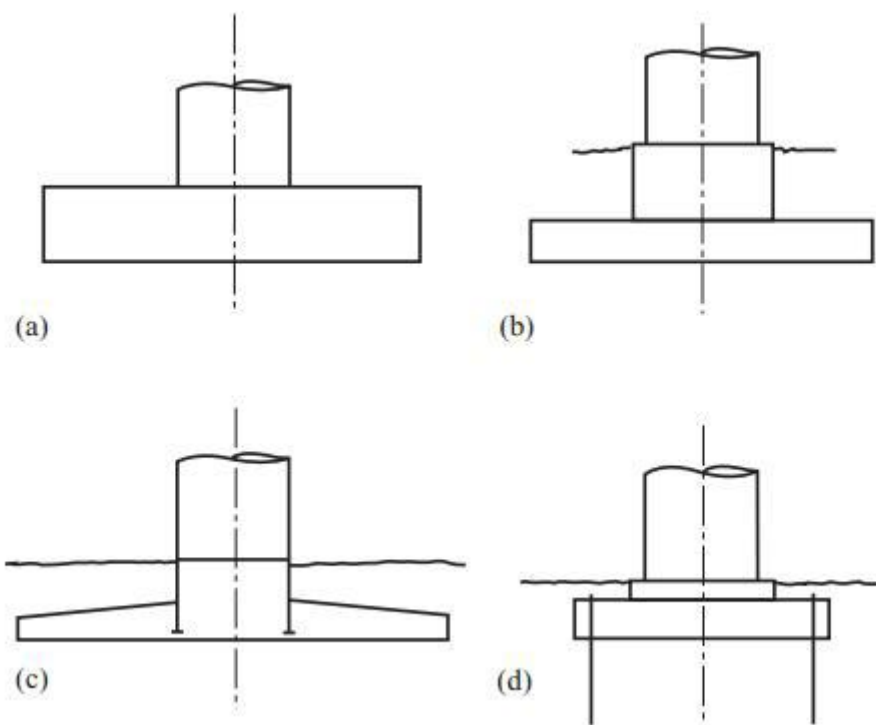
Kuva 21. CT-paaluista muodostettu yksittäinen suurpaalu. Suurpaalu voidaan muodostaa tavallisesta CT-paaluelementistä (b) tai CT-paaluista, joissa T-profili on eriävässä kulmassa tavallisesta 180 asteen kulmasta. Paalu voidaan rakentaa suljettuna ympyränä tai jättää avonaiseksi (d) tilanteissa, joissa sijaintitarkkuutta ei saada riittäväksi, kuten kohdatessa suuria lohkkareita. (Lehtonen et. al. 2014, alkuperäinen lähde Laakso 2014).

Suurpaaluja käytetään esimerkiksi siltojen sekä tuulivoimaloiden perustamiseen (Lehtonen et. al. 2014, Burton et. al. 2011, Leino 2015). Tuulivoimaloiden perustoissa potentiaali paalujen käyttämiseen Suomessa sekä Euroopassa on tulevaisuudessa suuri. EU on linjannut energiapolitiikassaan, että se sitoutuu tuottamaan vuoteen 2020 mennessä 20 % tuottamastaan energiasta uusiutuvien energialähtein ja vuoteen 2030 mennessä 27 %. Vuonna 2012 uusiutuvien lähteiden osuus oli 14,1 %. (Euroopan Unioni 2014)

Tuulivoimaloiden perustaminen verrattuna tavanomaisiin rakenteisiin eroaa suuresti kuormien osalta. Sen lisäksi, että rakenteen painosta aiheutuvat suuret pystykuormat välittyvät perustuksilla, kohdistuu siihen tuulen takia suuria vaakakuormia, joka aiheuttaa suuren momentin rakenteen juureen. Tämän johdosta rakenteesta siirtyy perustukselle epäsymmetrinen kuorma, jossa toiselle puolen perustaa tulee suuri puristusjännitys ja toinen puoli perustuksesta pyrkii nousemaan ylöspäin. Tämän estämiseksi on tavallisesti kolme perustamistapaa, betonilaatalle perustaminen, monipaaluperustus tai yksittäiselle paalulle perustaminen. (Burton et. al. 2011)

Betonilaatalle perustaessa betonilaatan tarkoitus on omalla painollaan vastustaa laatan nousemista ylöspäin, eli kyseessä on niin sanottu gravitaatioperustus. Tämä perustamistapa tulee yleensä kyseeseen tilanteissa, jolloin kalliopinta tai tiivis, kantavuudeltaan hyvä maakerros on lähellä maanpintaa, jolloin rakenteen paino ei aiheuta suuria painumia ja maaperän kantokestävyys on riittävä. (Burton et. al. 2011) Huono puoli gravitaatioperustuksessa on se, että suuren painon saavuttamiseksi, myös betonimenekki on suu-

ri. Tätä voidaan kompensoida asentamalla kallioankkurit, jotka vastaanottavat momentista johtuvat vetovoimat ja siirtävät ne kallioon, jolla on suuri lujuus. Tällöin betonia ei tarvita niin suurta määrää. (Leino 2015) Erilaisia betonilaattaperustuksia on esitetty kuvassa 22.



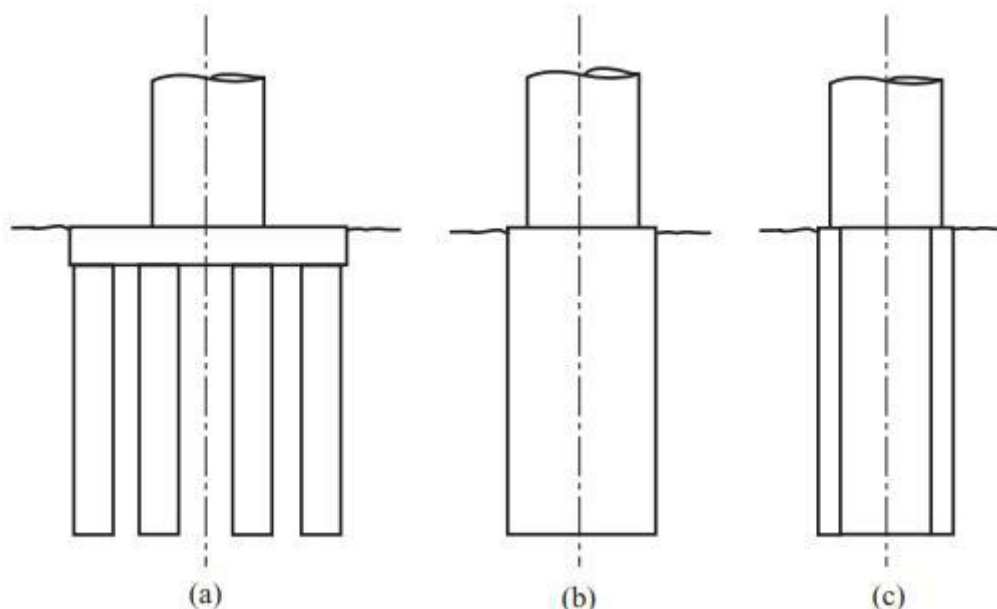
Kuva 22. Erityyppisiä betonilaattaperustuksia. Gravitaatioperustustyypit (a,b ja c) ja ankuroitu laattaperustus (d). (Burton et. al. 2011)

Kun pohjaolosuhteet ovat vaativat perustamisen näkökulmasta, eli maan kantokestävyys ei ole riittävä tai painumat muodostuvat liian suuriksi, perustetaan tuulivoimala tavallisesti paalujen varaan. Suomessa käytetään tavallisesti monipaaluperustusta, jossa paalut ovat joko lyönti- tai porapaaluja. Lyöntipaaluin toteutetussa perustuksessa paalut upotetaan kantavaan maakerrokseen tai kallioon, jolloin ne pystyvät vastaanottamaan puristuskuormia, eli ne estävät mahdolliset painumat, mutta eivät vastaanota momentista aiheutuvaa vetokuormitusta. Tällöin vaaditaan edelleen betonilaatta, joka toimii gravitaatioperustuksena. Ongelmia voivat myös aiheuttaa maaperä, jossa lyöntipaaluja ei saada upotettua riittävän syväälle.

Monipaaluperustus, joka toteutetaan porapaaluilla, ulotetaan tavallisesti kalliopintaan asti, jonka jälkeen paalujen alapuolelle porataan lisäreiät kallioankkureille, jotka juotoslaastin avulla juotetaan kallioon kiinni. Tällöin paalut ottavat vastaan puristuskuormat ja kallioankkurit vetokuormat. (Lotvonen et. al. 2005)

Suomessa harvemmin käytetty, mutta maailmalla yleinen perustamistapa tuulivoimaloille on yksittäiselle paalulle perustaminen (Leino 2015). Tällöin paalu toimii painumia

estävän perustuksen lisäksi ikään kuin tukiseinänä, jolloin paaluun kohdistuvat passiivimaanpaine estää perustuksen nousemista ylöspäin. Yksittäistä paalua käytettäessä voidaan betonilaatan koko optimoida hyvin pieneksi verrattuna perinteiseen gravitaatioperustukseen. Kuvassa 23 on esitelty tuulivoimalan paaluperustustapoja.



Kuva 23. Tuulivoimaloiden perustukset monipaaluperustuksena (a) tai yksittäispaaluperustuksena (b) ja (c). (Burton et. al. 2011)

Etuja yksittäispaaluperustuksen tekemiseen useasta CT-paalusta on (Lehtonen et. al. 2014) mukaan:

- Suurpaalun halkaisija voidaan valita 0,5 m ja usean metrin väliltä. Ylärajaa paaluhalkaisijalle ei ole.
- CT-paaluja voidaan jatkaa, jolloin esimerkiksi paalujen kuljettaminen vaikeisiin kohteisiin, kuten saarille, vuoristoalueelle yms. helpottuu, kun paalut voidaan kuljettaa esimerkiksi 1-6 m elementteinä
- CT-paalut voidaan asentaa myös pienessä tilassa, kuten kellareissa
- Suurpaalun keskiosa voidaan hyödyntää paaluperustuksessa, käyttäen esimerkiksi suihkuinjektointia (kts. kuva 23)

Sillat perustetaan heikkolaatuisella pohjamaalla usein suurporapaalujen varaan, jotta voidaan välttää esimerkiksi painumista johtuvat ongelmat (Isohaka 2015). Siltojen pohjarakenteiden suunnittelu Suomessa nojaa Eurokoodiin, ja suunnittelun helpottamiseksi on tehty suunnitteluohje, Liikenneviraston julkaisu ”Eurokoodin soveltamisohje – geotekninen suunnittelu - NCCI7” (Liikennevirasto 2017). Ohjeistuksessa käsitellään muun muassa paaluperustuksen suunnittelua. Porapaalujen osalta ohjeistus käsittelee vain paaluja, jotka ulottuvat kallioon asti. Ainoa ohjeistuksen asettama vaatimus, jolla on vaikutusta suunnitteluun CT-paalun ollessa kyseessä, on tilanne, jolloin porapaalun halutaan

olevan juurestaan momenttijäykkä. Ohjeen vaatimukset tällaiselle paalulle ovat (Liikennevirasto 2017):

- Paalu tulee asentaa kolme kertaa oman halkaisijansa syvyyteen kallioon tai vinon kalliopinnan ($>30^\circ$), neljä kertaa halkaisijansa
- Paalun ja kallioreiän väli tulee huuhdella puhtaaksi ja injektoida sementillä täyteen.

CT-paalun profiili on avoin, jolloin kallioreiän ja paalun välisen tilan injektoinnin yhteydessä sementtiä voi mennä myös paalun sisälle. Paaluperustuksen mitoitus silloissa tehdään kuten tavallisessa paaluperustuksessa, tosin rajoituksella, että paaluissa ei saa vaikuttaa pysyvänä kuormana käyttörajatilassa vetokuormia. Mikäli näin on, otetaan vetokuorma vastaan vetoteräksin. (Liikennevirasto 2017)

5. KENTTÄTUTKIMUKSET

Osana tutkimusta teetettiin kenttätutkimus Keravalla, jossa tavoitteena oli porata 15:n paalun porapaaluseinä kuusimetrisistä CT-porapaaluista, joka toimii noin 2,5 metriä syvän kaivannon tukiseinä. Koeasennuksen ensisijaisena tavoitteena oli tutkia paaluseinän asennustavan toimivuutta karkearakeisissa kitkamaissa. Toissijaisia tavoitteita oli:

- saada tietoa paalujen uusiokäytettävyydestä nostamalla paalut ylös ja tekemällä havaintoja niiden kunnosta
- kerätä porapaaluseinässä tapahtuvien horisontaalisten siirtymien sekä seinän taustalla tapahtuvien maanpinnan pystysuuntaisten siirtymien suunnat ja suuruudet, jotka tehty kaivu aiheutti
- kerätä porauksen aiheuttaman maanpinnan pystysuuntaisen siirtymän suuruudet ja suunnat.

Tarkemmin koeasetelma on kuvattu alaluvussa 5.1.

5.1 Koeasennuskohde

5.1.1 Kohteen sijainti ja valintaperusteet

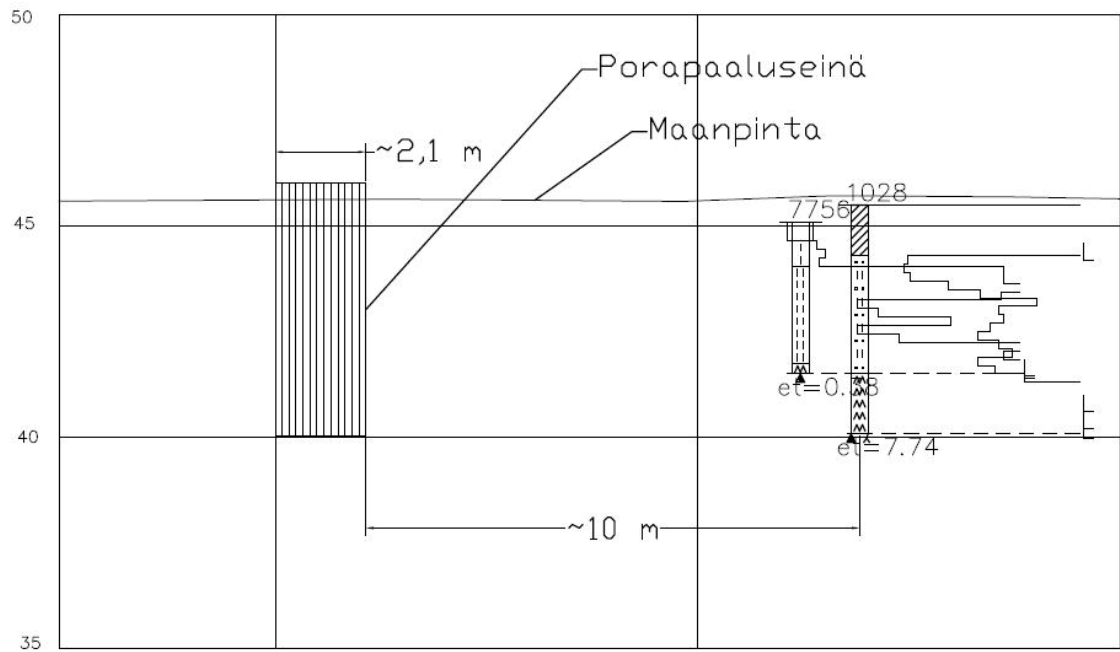
Koeasennuskohde sijaitsee Keravalla Pasila-Riihimäki -ratatyömaan yhteydessä Postlarinkadun päädyssä, joka toimii työmaalla koneiden ja autojen kääntöpaikkana sekä materiaalivarastona. Koepaikan länsipuolella kulkee Helsinki-Tampere -rata ja itäpuolella Sköldvikin rata, jonka liittymisvaihe Helsinki-Tampere -rataan on koepaikan pohjoispuolella. Koekohde pyrittiin valitsemaan siten, että siitä on tehty kattavasti pohjatutkimuksia, osa porauksesta päästään tekemään moreeniin ja että olosuhteet ovat haastavat kaivannon tuentarakenteiden asennuksen näkökulmasta.



***Kuva 24.** Koekohteen itäpuolella kulki Sköldvikin rata ja länsipuolella Helsinki-Tampere - rata. Kuvassa edessä näkyy Ylikeravantien silta asennuspaikan pohjoispuolella. Asennuspaikka sijaitsee luiskan yläpäässä porausvaunun vasemmalla puolen.*

5.1.2 Pohjaolosuhteet

Pohjatutkimusten ja paalujen porausaikojen perusteella kohteessa kalliopinta sijaitsi noin 6...8 metrin syvyydessä maanpinnasta. Pinnassa oli noin kahden metrin kerros sekalaista karkeaa täyttöä, jossa näköhavaintojen perusteella oli seassa muovia, puuta sekä tiilenpalasia. Täytön alla oli savea tai savista silttiä 2...4 metriä, jonka alla hiekkamoreenia ennen kalliopintaa. Poikkileikkaus pohjatutkimuksista porapaaluseinän linjassa on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Pohjatutkimusleikkaus porapaaluseinän linjassa.

5.2 Työn suoritus

Koejärjestelyt koostuivat kohteen valmistelusta, paalujen porauksesta, kaivannon kaivusta, siirtymämittauksista sekä paalujen ylös nostamisesta.

5.2.1 Kohteen valmistelut

Seinän suoruuden havainnointia varten ennen paalujen porausta valittiin ensimmäisen paalun paikka sekä seinän poraussuunta ja seinän poraussuunnassa referenssipiste noin 2,5 metrin päähän ensimmäisestä paalusta, jotka merkittiin maahan maalilla. Merkityltä ensimmäisen paalun kohdalta ja suunnan referenssipisteen kohdalta mitattiin koordinaatit.



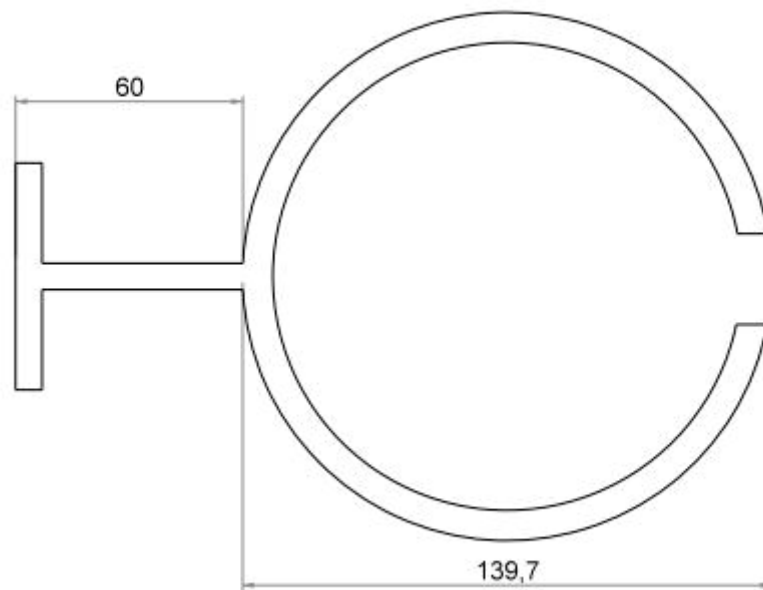
Kuva 26. Pystysuuntaisten siirtymien mittaukset toteutettiin maahan upotetuilla harjaterästangoilla.

Maanpinnan pystysuuntaisten siirtymien mittausta varten asennettiin seinän taustalle 10 mittauspistettä. Mittauspisteet olivat noin metrin pituisia harjaterästankoja, jotka upotettiin maahan noin 80 senttimetrin syvyyteen. Yksi mittauspisteistä on esitetty kuvassa 26. Mittauspisteiden asennuksen jälkeen pisteistä mitattiin referenssikorot.

5.2.2 Paalujen poraus

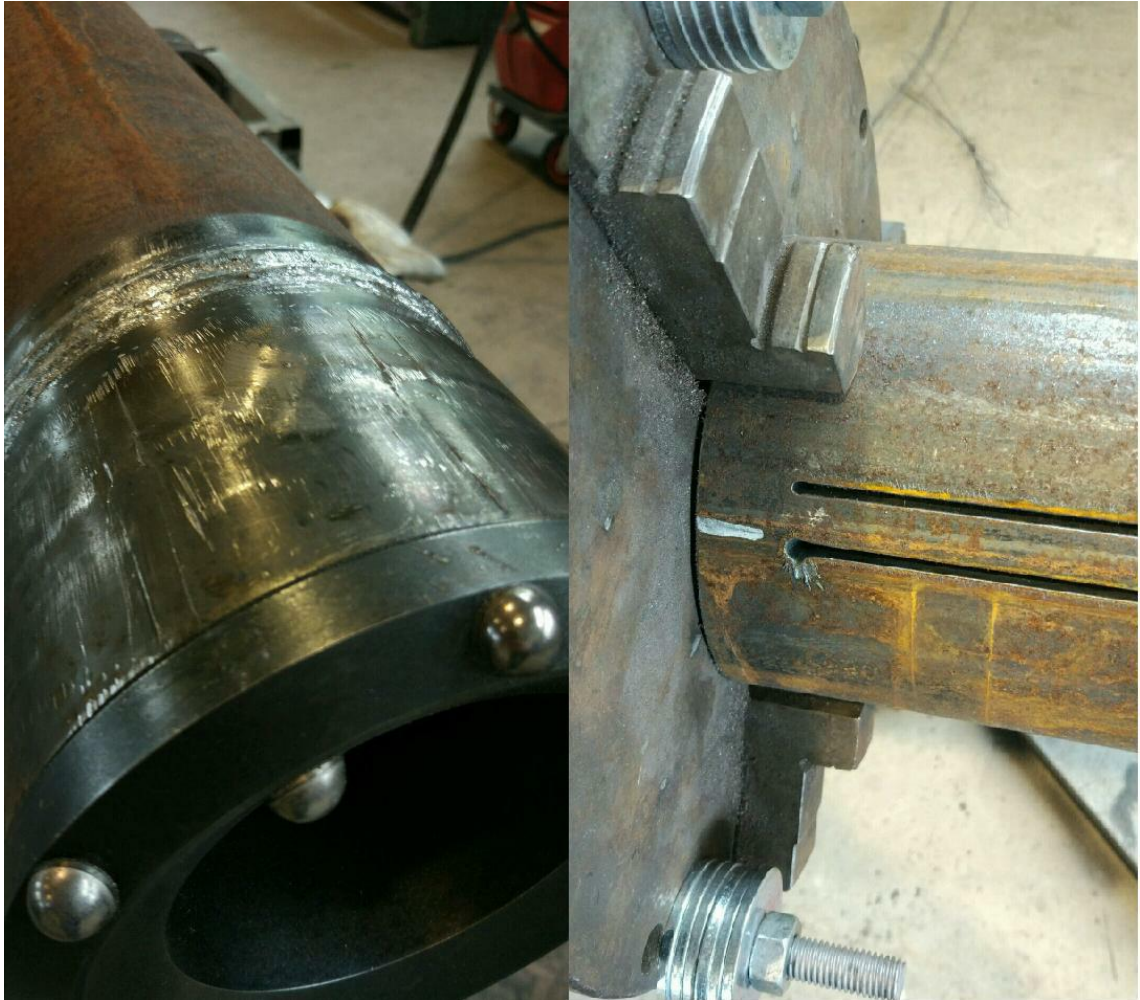
Paalut

Porattu porapaaluseinä koostui CT-paaluista, joiden C-osan halkaisija oli 139,7 mm. T-profiilin pituus oli 60 mm. Poikkileikkauksen mitat on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. *Asennettujen paalujen mitat.*

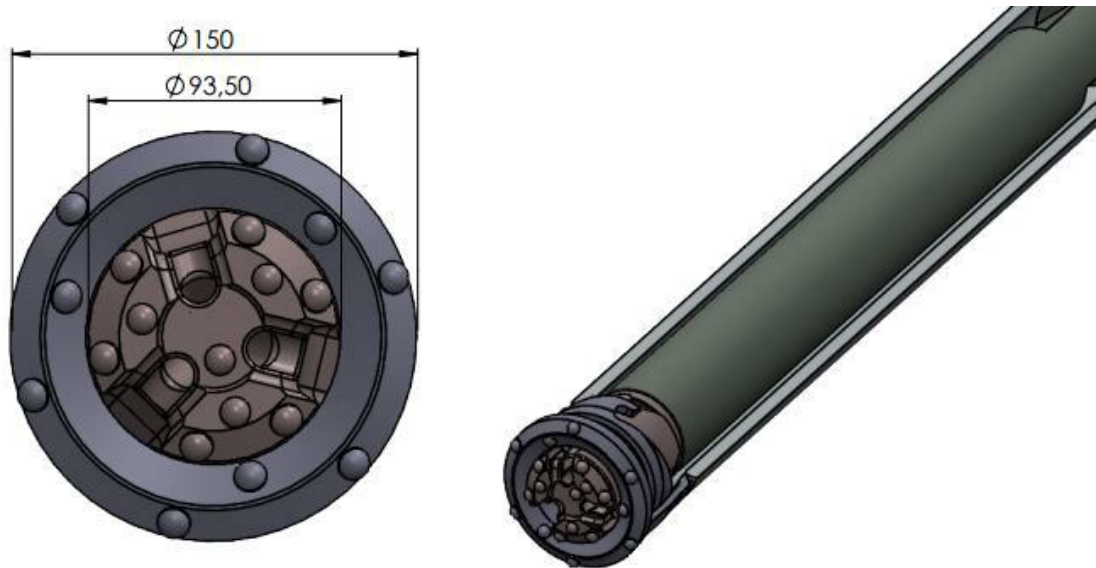
Paaluista 14:ään oli hitsattu T-profiili ja ensimmäinen porattavista paaluista oli pelkkä C-paalu. C-profiili valmistettiin putkiprofiilista, johon leikattiin naarasponttina toimiva hahlo laserleikkurilla. Paalun yläpäähän jätettiin valmistuksen yhteydessä kapea silloitus, joka poistettiin kulmahiomakoneella paalun porauksen jälkeen. Kuvassa 28 siltaus on vielä paikallaan paalussa. Pituudeltaan paalut olivat 6 metriä.



***Kuva 28.** Vasemmalla avarrinkruunun ja maakengän kiinnitys paaluun ja oikealla paalun yläpäähän jätetty siltaus, joka poistettiin porauksen jälkeen. Kuvassa hahlostasta on vielä poistamatta laserleikattu teräs.*

Porauskalusto ja -menetelmä

Paalujen poraukseen käytettiin uppovasarakalustoa. Porausmenetelmänä käytettiin keskistä porausmenetelmää, jossa rengasterä-mallinen avarrinkruunu oli kiinnitetty paaluun hitsattuun maakenkään. Porauksessa käytetyn avarrinkruunun halkaisija oli 150 mm ja pilottikruunun halkaisija 93,5 mm. Kuvassa 29 on esitetty havainnekuva porauskalustosta mittoineen.



Kuva 29. Porauskaluston havainnekuva mittoineen. (Laitinen 2017)

Poraus ja sen aikaiset havainnot

Itse paalujen poraus kohteessa koostui seitsemästä työvaiheesta:

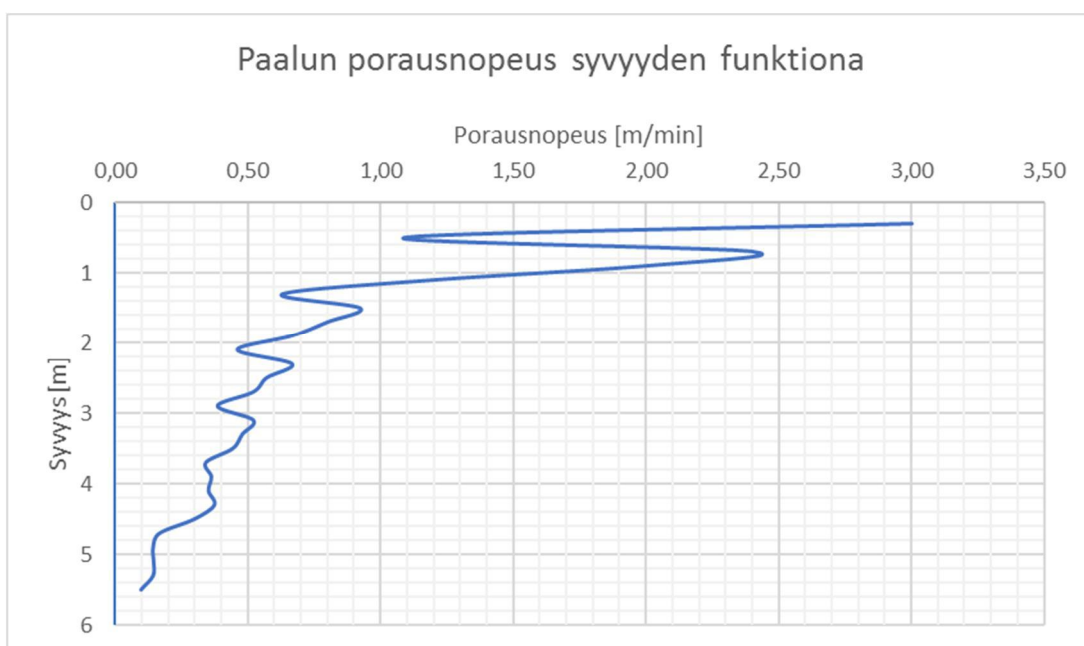
1. Poraustangon ja pilottikruunun asettaminen paaluputkeen
2. Paalun nosto porausvalmiiksi varastointialueelta
3. Pilottikruunun lukitus avarrinkruunuun
4. Paalun ja urosponatin asemointi naarasponatin kohdalle
5. Poraus haluttuun määräsyyvyteen
6. Porauskaluston nosto paalusta
7. Paalun siltauksen poisto

Ennen paalujen nostamista porausasentoon, asennettiin porapaalujen paaluputken sisälle poratangot sekä pilottikruunu, kun paalut olivat vielä varastointialueella. Paalut nostettiin noin 5 metrin etäisyydellä porauspaikasta olevalta varastointialueelta porausvaunun vaijerinostimella porausasentoon. Samalla kun paalu nostettiin porausasentoon, kiinnitettiin poraustangon yläpää vaunun porauskalustoon.

Paalujen asemoinnissa tavoite on saada paalu oikeaan poraussijaintiin siten, että paalun urosponatti on naarasponatin, eli paaluputken hahlon kohdalla. Kun urosponatti on saatu naarasponatin kohdalle, paalu porataan haluttuun määräsyyvyteen. Paalut suunniteltiin porattavaksi siten, että ensimmäisestä paalusta jää maanpinnalle 20 cm. Seuraavat paalut suunniteltiin porattavaksi hieman syvemmälle, jotta voidaan havainnoida, osuvatko paalun alapäässä olevat avarrinkruunut toisiinsa aiheuttaen ongelmia poraukseen. Paalujen asemoinnin havaittiin kuitenkin olevan hyvin haastavaa, mikäli urosponattia ei saada edellisen paalun naarasponatin sisälle siten, että porattava paalu oli vielä täysin maanpinnalla. Tämän johdosta toisesta paalusta jätettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen maanpinnan yläpuolelle noin 40 cm, jonka jälkeen joka toinen paalu porattiin

alemmaksi ja joka toinen ylemmäksi kuin edellinen. Tämän osalta poikkeuksen muodostivat kahdeksas ja yhdeksäs paalu jotka päätyivät kalliopintaan asti ja niiden poraus päätettiin keskeyttää siten, että paalujen pää jäi edellistä ylemmäksi. Porauksessa ei havaittu ongelmia porattavan paalun ohittaessa poraussyvyudessa edellistä paalua.

Yksittäisten paalujen etäisyys edelliseen paaluun nähden vaihteli hyvin paljon, kun mittaus tehtiin paalujen yläpäästä. Paalujen keskimääräinen etenemä oli noin 164 mm, eli urospontista keskimäärin noin 36 mm oli edellisen paalun C-profiilin sisäpuolella. Vaihteluväli etenemälle oli noin 140-178 mm. Porapaalut eivät myöskään asettuneet kovin suoraksi seinämäksi. Paalujen asemoinnin apuna ei käytetty minkäänlaista ohjuria, jonka avustamana paaluseinästä olisi todennäköisesti helpompaa saada suora sekä yksittäisten porapaalujen etäisyys toisistaan saataisiin lähemmäksi vakiota.



Kuva 30. Paalun 5 porausnopeus syvyyden funktiona.

Porausnopeutta mitattiin poratessa paalua 5. Porausnopeus syvyyden funktiona on esitetty kuvassa 30. Porausnopeuden perusteella täyttökerros oli noin 1,5 m, jonka alla oli noin 3 metrin savi tai savinen silttikerros ennen moreenia. Porausnopeus täyttömaassa oli keskimäärin 1,9 m/min, savessa tai savisessa siltissä 0,52 m/min ja moreenissa 0,14 m/min. Muista paaluista porausnopeutta ei mitattu syvyyden funktiona, mutta paalujen kokonaisporausajat olivat hyvin lähellä toisiaan. Porausnopeudet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Keskimääräiset porausnopeudet eri maakerroksissa.

Tulkittu maalaji	Porausnopeus keskimäärin [m/min]
Täyttö	1,9
Savi/savinen siltti	0,52
Moreeni	0,14

Porauksen aikana ei havaittu ympäristössä muita poikkeamia, kuin porasoijan poistuminen poikkeuksellisesti. Ensimmäistä paalua poratessa porasoija poistui paalun ollessa lähellä poraussyvyyttä edelleen paalun ulkopuolelta, joka todennäköisesti johtuu ensimmäisen paalun avoimesta profiilista. Kuvassa 31 voidaan havaita porasoijan poikkeuksellinen poistuminen. Putkessa vallitsee suuri paine ilmahuuhtelun takia, jolloin porasoija poistuu naaraspontin hahlon kautta ympäröivään porauksesta löyhentyneeseen maa-ainekseen. Samankaltaisia havaintoja on tehty myös RD-porapaaluseinän asennuskokeissa (Uotinen & Jokiniemi 2013). Muiden paalujen porauksen yhteydessä tällaista poikkeavuutta ei havaittu, vaan porasoija poistui paalujen yläpäistä. Porasoijan poistuminen ympäröivään maa-ainekseen tarkoittaa käytännössä sitä, että porauksessa käytetty paineilma poistui samassa yhteydessä. Tämä voi aiheuttaa maa-aineksen häiriintymistä.

Kun paalu oli porattu haluttuun määräsyvyyteen, porauskalusto, eli poratangot sekä pi-lottikruunu poistettiin paaluputkesta. Tämän jälkeen paalusta poistettiin yläpäässä oleva C-profiilin siltaus kulmahiomakoneella. Kun siltaus poistettiin, kuului kovaääninen napsahdus, joka indikoi sitä, että paalussa oli sisäisiä jännityksiä. Kuten edellä mainittiin, tämä havaittiin myös tehtaalla koepaalun siltauksen poistossa. Paalun halkaisija mitattiin työntömitalla ennen siltauksen poistoa sekä siltauksen poiston jälkeen kahdesta paalusta. Toinen paaluista oli ensimmäinen, eli pelkkä C-paalu ilman urosponnttia. Paalun alkuperäinen halkaisija oli 140,1 mm ja siltauksen poiston jälkeen halkaisija kasvoi noin $2,0 \pm 0,1$ mm riippuen mittaussuunnasta. Toinen mitattu paalu oli tavallinen CT-paalu, jonka alkuperäinen halkaisija oli $139,8 \pm 0,1$ mm ja siltauksen poiston jälkeen halkaisija kasvoi $2,4 \pm 0,3$ mm riippuen mittaussuunnasta. Paalujen halkaisijoiden muutokset on esitetty taulukossa 6. Paalujen halkaisijat mitattiin edelleen paalujen noston jälkeen, mutta mitattavissa olevia muutoksia halkaisijoissa ei enää tapahtunut.



Kuva 31. Porasoija poistui ensimmäisen paalun porauksen aikana paalun loppumittallakin ympäröivästä maasta.

Taulukko 6. Paalujen mitatut halkaisijat ja muutokset halkaisijoissa.

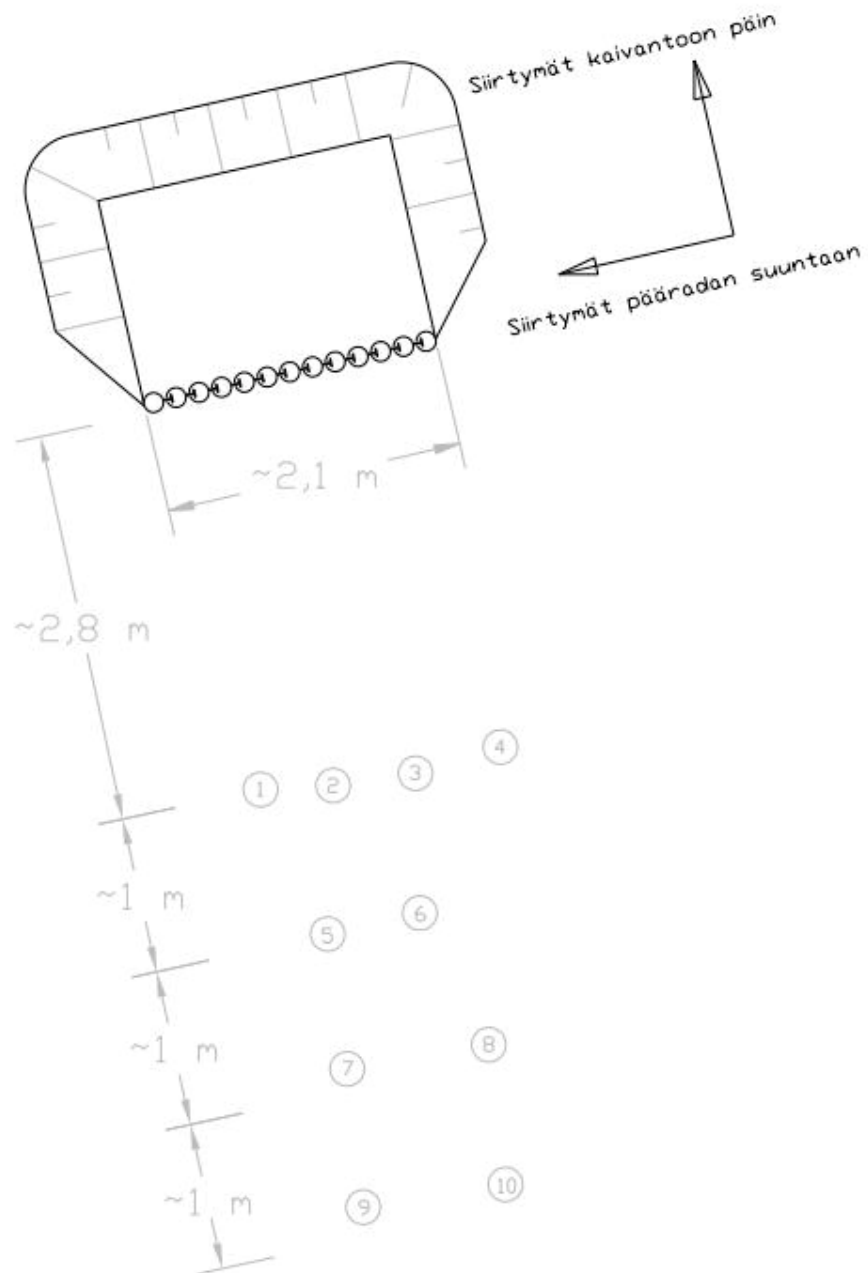
Paalutyyppe	Alkuperäinen halkaisija [mm]	Halkaisija siltauksen poiston jälkeen [mm]	Muutos halkaisijassa [mm]
C	140,1	$142,1 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,1$
CT	139,8	$142,2 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,3$

Suunnitellun 15 paalun sijaan lopulta paaluista porattiin 13 kappaletta johtuen aikataullisista ongelmista.

5.2.3 Siirtymämittaukset

Mittausohjelma

Ennen paalujen porausta asennettujen pystysiirtymämittauspisteiden asennus on kuvattu luvussa 5.2.1 Kohteen valmistelut. Mittauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Pystysiirtymää mitattiin kymmenessä mittauspisteessä. Kuvassa on esitetty nuolin porapaaluseinän vaakasiirtymien suunnat.

Paalujen porauksen päätyttyä ennen porausta asennetuista pystysiirtymämittauspisteistä mitattiin porauksen aiheuttama pystysuuntainen siirtymä sekä paaluihin 2, 7 ja 13 asennettiin inklinometriputket, joista tehtiin alkumittaukset, eli mitattiin paalujen suoruus porauksen jälkeen. Alkumittaukset tehtiin perjantaina 16.6. noin kello 17.

Kaivanto kaivettiin auki maanantaina 19.6. noin kello 7. Kaivannon syvyys oli noin 2,5 metriä ja sivuilta, joissa ei ollut porapaaluseinää, kaivannon reunat oli luiskattu 1:1,5

kaltevuuksiseen luiskaan. Ensimmäinen inklinometrimittaus tehtiin välittömästi kaivun jälkeen ja seuraava noin 1,5 h ensimmäisen jälkeen. Painumamittauspisteistä mitattiin pystysuuntaiset siirtymät noin 1 h kaivun jälkeen.

Mittaustulokset

Paalujen porauksen jälkeen tehdyissä painumamittauksissa ei havaittu alaspäin tapahtunutta siirtymää, kuin yhdessä mittauspisteessä, joka sijaitsi eturivissä reunimmaisena oikeassa reunassa katsoen mittauspisteistä kohti porapaaluseinää. Tässä pisteessä siirtymä oli 9 mm. Muissa pisteissä siirtymät tapahtuivat ylöspäin. Ensimmäisen rivin muissa pisteissä siirtymät olivat 3 mm ja seuraavissa riveissä kaikissa pisteissä 2 mm. Kaivun jälkeen tehtyjen mittausten perusteella kaikissa mittauspisteissä oli tapahtunut 1 mm suuruinen siirtymä ylöspäin. Mitatut siirtymät olivat hyvin pieniä ja ne voivat johtua myös epätarkkuudesta mittauksessa tai muista ulkoisista tekijöistä. Pienet siirtymät johtuivat todennäköisesti mittauspisteiden etäisyydestä seinämästä. Urakoitsijan tarvitseman työtilan takia pisteitä ei voitu sijoittaa lähemmäksi seinää. Kaivanto on kooltaan pieni, jonka takia kaivannon päädyissä esiintyvä maa-aineksen leikkauslujuudesta johtuva päätyvastus on merkittävä. Päätyvastus kaivannon päissä pienentää seinän vaakasiirtymiä sekä tämän johdosta myös pystysiirtymiä mittauspisteissä. Todennäköisesti pystysiirtymä oli suurempi lähempänä seinää, jonne mittauspisteitä ei voitu sijoittaa.

Inklinometrimittausten alkumittausten perusteella voidaan havaita paalujen pystysuoruus sekä porapaaluseinän suunnassa, että kohtisuoraan porapaaluseinää kohti. Paalut 2 ja 7 olivat seinään kohtisuorassa suunnassa käytännössä suorina, siirtymien ollessa muutamien millimetrin luokkaa. Paalu 13 oli selkeästi vinossa putken yläpään ollessa noin 45 mm sivussa nähden putken alapäähän kohtisuoraan porapaaluseinän etenemissuuntaa kohti. Porapaaluseinän etenemissuunnassa paalun 2 yläpäässä oli noin 10 mm siirtymä verrattuna paalun alapäähän pääradasta poispäin. Vastaava siirtymä paalussa 7 oli 75 mm päärrataan päin ja paalussa 13 100 mm päärrataan päin. Mittausten perusteella näyttää siltä, että porapaaluseinän yläpää ”kallistuu” kohti seinän etenemissuuntaa, mitä useampi porapaalu on porattuna, joskin kallistuman lisäys paalujen välillä ei ole lineaarista, vaan mitä useampi paalu on porattu, sitä pienempi kallistuman lisäys on. Tämän suhteen mittausdataa on kuitenkin hyvin rajallinen määrä ja tutkittavan seinän ollessa lyhyehkö, selkeää johtopäätöstä sen perusteella ei voida tehdä. Kaivulla ei ollut merkittävää vaikutusta seinän kallistumaan paaluseinän etenemissuuntaan.

Kaivun jälkeiset siirtymät on käsitelty alaluvussa 6.4.1, jossa niitä on vertailtu mallinustuloksiin.

Inklinometrien alkumittaustulokset on esitetty liitteessä 1, kaivun jälkeiset inklinometrimittaustulokset liitteessä 2 ja pystysiirtymämittaukset liitteessä 3.

5.2.4 Paalujen ylösnosto

Johtuen CT-porapaaluseinän rakenteesta nosto tulee suorittaa alkaen viimeisenä poratusta paalusta ja päättyen ensimmäisenä porattuun paaluun. Mikäli näin ei tehdä, edellisen paalun urospontti jää kiinni nostettava paalun naarasponatin päättymiskohtaan ja tällöin kaikki nostettavan paalun jälkeen poratut paalut nousevat ylös.

Paalujen nosto suunniteltiin alun perin tehtäväksi kaivinkoneella kaivannon täytön ja mittausten jälkeen siten, että paalun yläpäähän porattiin reikä, josta saatiin ketjulla paalu kiinnitettyä kaivinkoneen kauhaan. Ensimmäinen paalu nousi tällä tekniikalla ongelmitta noin 0,5 metriä, jonka jälkeen nosto keskeytyi. Todennäköinen syy keskeytymiselle oli paalussa olleen avarrinkruunun kiilautuminen paalua vasten tiivistyneeseen moreeniin. Tämän jälkeen nostoa yritettiin seuraavasta paalusta, mutta nosto keskeytyi samassa kohtaa, jolloin nostettavan paalun naarasponatin alapää saavutti edellisen paalun urosponatin alapään.

Paalujen seuraava nostoyritys tehtiin kymmenen päivän kuluttua. Nostoyritys tehtiin tärinäavusteisella paalunasennuslaitteella, jolla paalut saatiin ylös. Osa paaluista vaurioitui noston aikana, erityisesti paalun yläpäästä noin metrin matkalta. Vauriot johtuivat sekä kaivinkoneen puomin lyhyydestä, että paalunasennuslaitteen puristusotteen voimasta, joka ylitti paalun puristuskapasiteetin. Vaurioituneita paaluja on esitetty kuvassa 33. Osa paaluista nostettiin ylös kaksi tai kolme paalua kerrallaan, jolloin suurimmat vauriot tulivat paaluun, josta paalunasennuslaitteella otettiin kiinni, kun taas loput paaluista selvisivät hyvin pienin vaurioin.



Kuva 33. Osa paaluista vaurioitui pahasti yläpäästään noston yhteydessä.

5.2.5 Porausnastojen kulumamittaus

Paalujen ylösnoston jälkeen mitattiin kolmesta eri avarrinkruunusta yksittäisen porausnastan kuluneisuus. Mittaus suoritettiin työntömitalla. Porausnastan teoreettinen halkaisija uutena on 151,25 mm. Yksittäiset havaitut halkaisijat olivat 150,3 mm, 150,8 mm ja 150,7 mm ja täten yksittäiset kulumat 0,9 mm, 0,5 mm ja 0,5 mm. Mittaaja epäili suurimmassa kulumassa mittausrvirhettä. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Porausnastojen kulumamittaustulokset

Nasta	Alkuperäinen teoreettinen halkaisija [mm]	Mitattu halkaisija porauksen ja noston jälkeen [mm]	Kuluma [mm]
1	151,25	150,3	1,0
2	151,25	150,8	0,5
3	151,25	150,7	0,6
Keskiarvo	151,25	150,6	0,7

6. CASE-MALLINNUKSET

6.1 Käytetyt laskentamallit ja –ohjelmat

Laskentamallinnukset tehtiin GeoCalcilla. GeoCalcin laskenta perustuu palkki-jousimalliin, joka ratkaistaan elementtimenetelmällä.

6.1.1 Jousimallimenetelmän perusteet

Jousimallimenetelmässä tukiseinärakenteen ja maan väliseen rajapintaan tulevia kuormia pyritään yksinkertaistamaan jousimalleilla. Yleisimmin jousimalleista käytetään Winklerin alustamallia. Winklerin alustamallin perusolettamus on, että ns. alusta on rakenne, jonka ainoa ominaisuus on taivutusjäykkyys ja täten alustaan kohdistuva alustapaine on suoraan verrannollinen taipumaan. Näiden riippuvuutta kuvataan kaavalla 21. (Ou 2006)

$$k_s = \frac{p}{\delta} \Leftrightarrow p = k_s \delta , \quad (21)$$

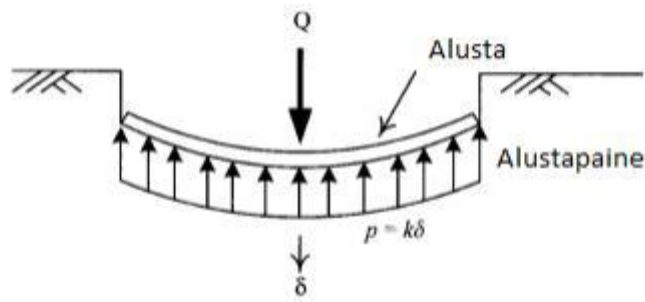
jossa

k_s on ns. alustaluku,

δ on siirtymä ja

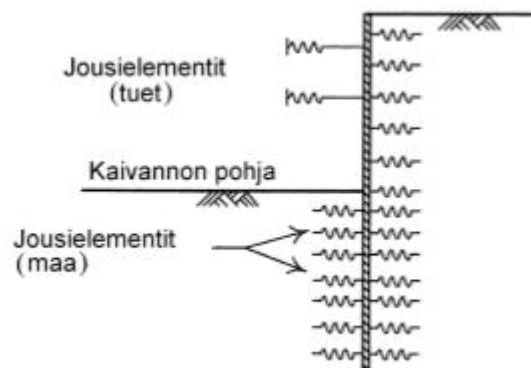
p on alustapaine.

Winklerin alustamallin periaate on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Winklerin alustamallin perusperiaate. (Ou 2006)

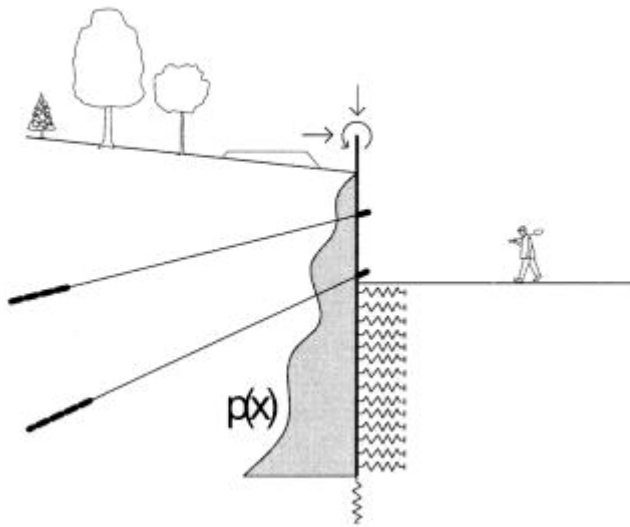
Winklerin alustaa käytettäessä tukiseinämallinnukseen voidaan myös olettaa, että alusta muodostuu tasavälein olevista jousista, jolloin sillä pystytään mallintamaan tukiseiniä olettaen tukiseinän olevan yksiulotteinen palkki. Tällöin jouset mallintavat maa-ainesta ja annetuilla parametreilla pyritään mallintamaan paine-siirtymäkäyttäytymistä oikein lepopaineen ja maanpaineen raja-arvojen välillä. Menetelmä mahdollistaa täten sen, että maanpaineen suuruus riippuu sekä jousien, että seinän ja tukien jäykkyyksistä. Jousimallin periaate on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Jousimallin toimintaperiaate. (Ou 2006)

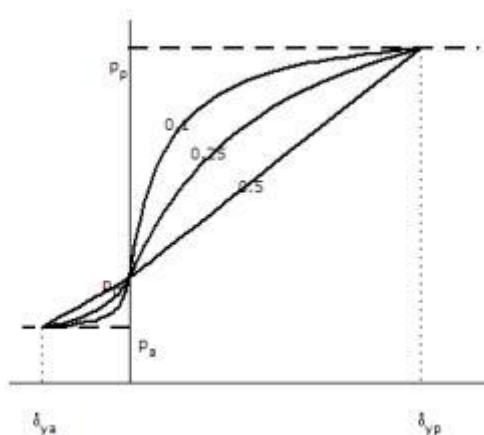
6.1.2 GeoCalc

GeoCalc ratkaisee tukiseinän palkki-jousilaskentamallin elementtimenetelmää käyttäen. Mallissa tukiseinä on 2D palkkielementti, johon voi kohdistua vaaka- ja pystyvoimia sekä taivutusmomenttia. Kaivannon puolella, eli passiivipuolella maanpaine mallinnetaan jousielementteinä ja aktiivipuolella maanpaine sekä muut kuormat kuormafunktioina. Elementtimenetelmän laskentaan kuormafunktio muunnetaan ohjelmassa maakerrosrajojen mukaan määritettyihin solmupisteisiin solmukuormiksi. Laskennan yhteydessä jokaisessa solmupisteessä kuormia ja seinän siirtymiä iteroidaan, kunnes saavutetaan tasapainotila. Kyseinen palkki-jousilaskentamalli on esitetty kuvassa 36. (Vianova 2011)



Kuva 36. GeoCalcin laskentamallissa tukiseinää mallinnetaan 2D palkkina ja kuormat jousina tai kuormafunktiona riippuen onko kuorma aktiivi- vai passiivipuolella. (Vianova 2011)

Kuormien vaihteluväli määrittäytyy GeoCalcissa siten, että ohjelma ratkaisee lepopaineen arvon sekä maanpaineen raja-arvot. Aktiivi- ja passiivipaineet lasketaan Coulombin teorian mukaisesti. Lepopaineen ja maanpaineiden raja-arvojen välillä maanpaine voidaan määrittää joko siirtymä- (Displacement Controlled Model) tai maan muodonmuutosmoduuliperusteisesti (Modulus Controlled Model). Periaate molemmissa on sama. Annettavien parametrien perusteella muodostetaan hyperbolinen paine-siirtymä – yhteys, joka määrittää paineen suuruuden raja-arvojen välillä. Paine-siirtymä –yhteyden periaate on esitetty kuvassa 37. (Vianova 2011)



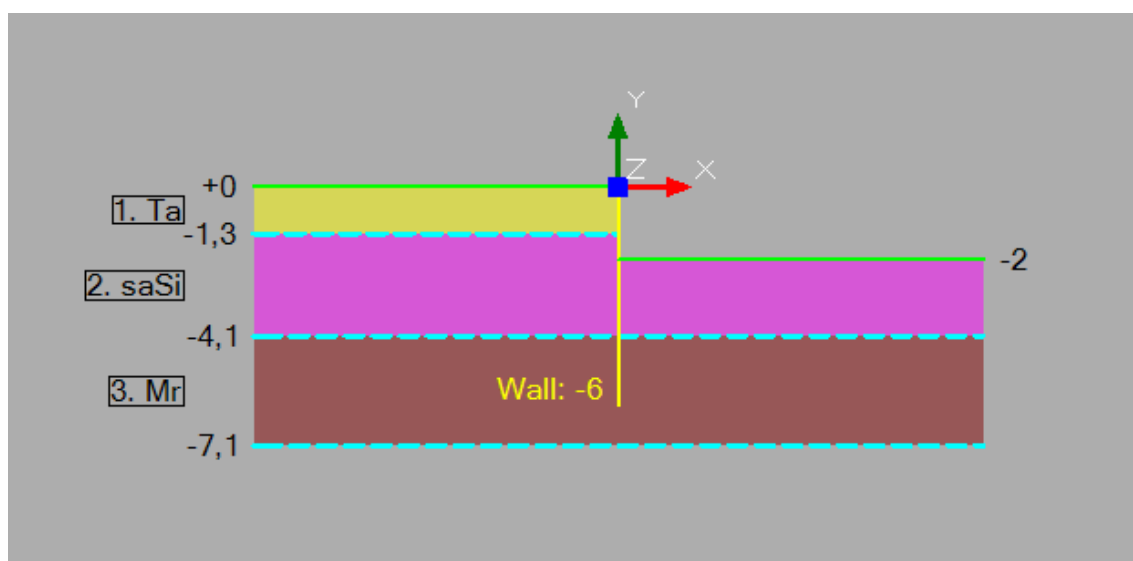
Kuva 37. Maanpaineiden ja siirtymien välinen yhteys. (Vianova 2011)

DCM –mallissa lähtötiedoksi annetaan täyteen maanpaineeseen vaadittavat seinän suhteelliset siirtymät δ_{ya} ja δ_{yp} sekä maanpaineen raja-arvojen välisen funktion epälineaari-

suuden määrittävät parametrit ξ_{50a} ja ξ_{50b} . MCM –mallissa taas siirtymäfunktio määritetään kokoonpuristuvuusmoduulin M perusteella. Lähtötiedoiksi annetaan ödometriko-keesta saatavat moduuliluku m , jännitysekspONENTTI n (yleisemmin β) sekä jännitystilan kerroin k . (Vianova 2011)

6.2 Keravan koeasennus, siirtymämallinnus

Keravan koeasetelma on esitelty tarkasti luvussa 5. Tässä alaluvussa on esitelty Keravan koeasennuksen laskennallinen siirtymämallinnus.



Kuva 38. GeoCalc-ohjelmassa käytetty geometria Keravan koeasennuksen mallinnukseen.

Maa-aineksen mallintamiseen käytettiin MCM-mallia, johon materiaaliparametrit määritettiin kairausten, kirjallisuuden ja keskustelujen perusteella. (Jääskeläinen et. al. 1999, Ketonen 2017). Seinän laskentaparametrit määritettiin tukiseinän rakenteellisen mitoituksen teorian mukaisesti. Laskenta suoritettiin tehokkailla jännityksillä, eli kaikki kerrokset oli asetettu avoimeen tilaan (drained). Maakerrokset määritettiin pohjatutkimustietojen mukaan. Kaikki käytetyt laskentaparametrit ja laskentatulokset on esitetty liitteessä 4. Pohjavesi arvioitiin laskelmassa seinän alapään alapuolelle, jolloin sillä ei ole vaikutusta laskentaan. Laskennassa käytetty geometria on esitetty kuvassa 38.

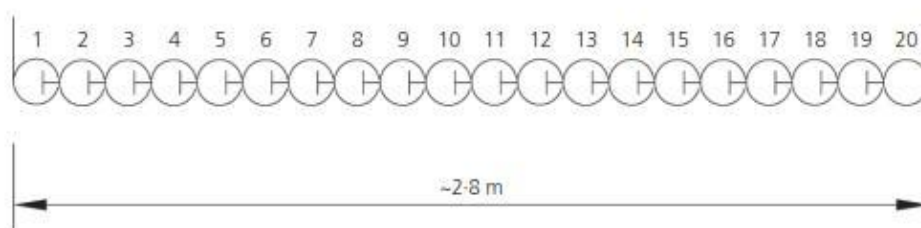
6.3 Naantalin koeasennus, siirtymämallinnus

Vuonna 2012 Naantalissa tehtiin samankaltainen porapaaluseinän koeasennus, kuin tähän työhön liittyvä Keravan koeasennus. Naantalin koeasennuksen tavoitteina oli (Larkela et. al 2016)

- kerätä tietoa paalun asennustavan toimivuudesta,
- mitata porauksen aiheuttamat maanpinnan pystysuuntaiset siirtymät,
- mitata vaakasuuntaiset kaivun aiheuttamat siirtymät paaluissa,
- mitata kaivun aiheuttamat maanpinnan pystysuuntaiset siirtymät sekä
- näköhavainnoin tutkia sementtihuhtelun toimivuutta ja sementin jakautumista paalun pinnalle esiin kaivetuista paaluista.

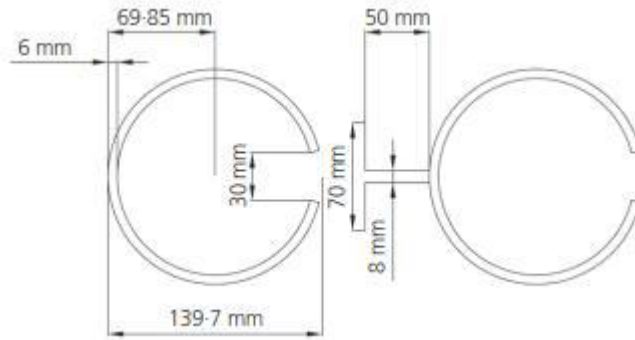
6.3.1 Yleistä

Naantalissa paaluja porattiin 20 kappaletta, joista viisi oli 8 metriä pitkiä ja 15 paalua 6 metriä pitkiä. Paalut oli numeroitu alkaen ensimmäisenä poratusta paalusta ja päättyen viimeiseen. Paalujen numerointi ja seinän leveys on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. Paalujen numerointi ja seinän leveys. (Larkela et. al. 2016)

Pidempiä paaluja käytettiin, jotta varmistettaisiin vähintään osan paaluista päätyvän kallioon tai moreeniin, sillä pohjatutkimuksia ei oltu tehty seinän välittömässä läheisyydessä. Paalun halkaisija oli 139,7 mm, eli sama, kuin Keravan kokeessa, mutta paalun muut mitat erosivat hieman Keravalla käytettyjen paalujen mitoista. Paaluissa käytetty teräslaatu oli S355. Naantalissa käytettyjen paalujen poikkileikkauksen mitat on esitetty kuvassa 40. (Larkela et. al. 2016)



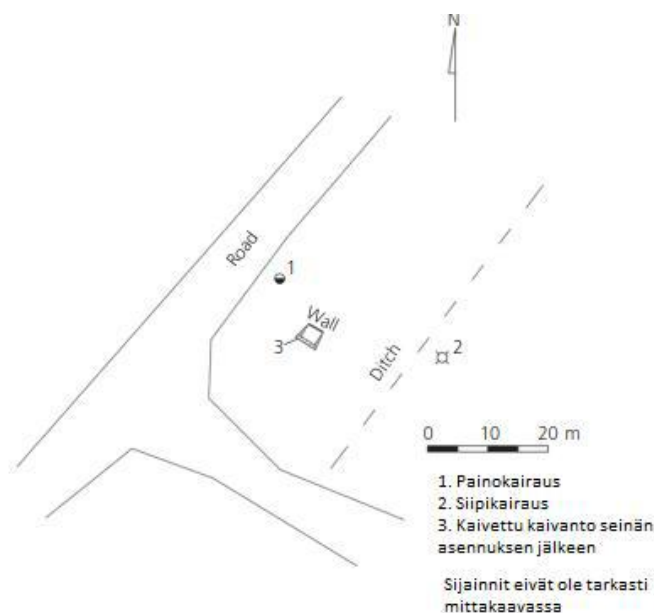
Kuva 40. Naantalin koeasennuksessa käytettyjen paalujen poikkileikkauksen mitat. (Larkela et. al. 2016)

Ensimmäinen paalu oli C-profiilin paalu ja lopuissa oli kiinnitettynä myös T-profiili, joka toimi urosponttina. Paalut 1-15 porattiin käyttäen ilmahuuhtelua ja paalut 16-20 sementtihuuhdella, jossa vesi-sementti –suhde oli 0,5. (Larkela et. al. 2016)

Paalujen porauksen jälkeen kaivettiin seinän toiselle puolelle noin 3,2 m syvä kaivanto.

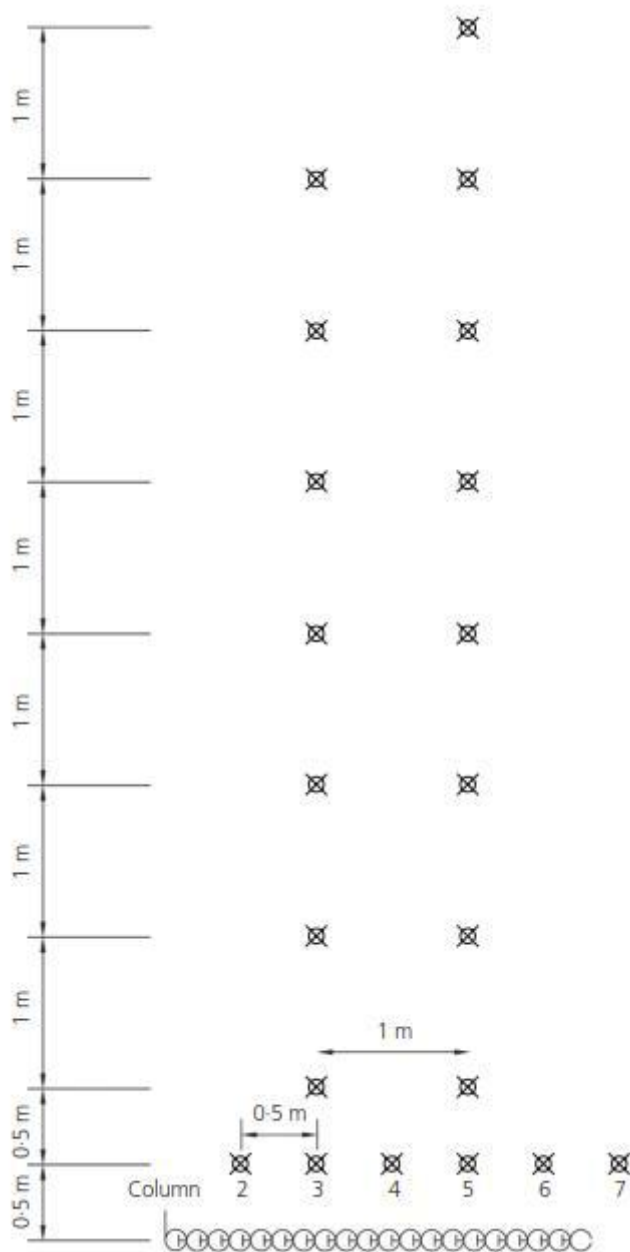
6.3.2 Pohjaolosuhteet ja ympäristö

Naantalin koekohteessa maanpinnan korkeustasossa oli alle 0,5 metrin vaihtelu 10 metrin säteellä porapaaluseinästä, eli maanpinta oli verrattain tasainen. Noin 15 metrin etäisyydellä seinästä oli kulkusuunnaltaan seinää kohti kohtisuora matala oja, jossa vedenpinnan oli havaittu olevan maanpinnan tasossa. 10 metrin etäisyydellä seinän suuntaisesti kulki tie. Testiasetelma on esitetty kuvassa 41. (Larkela et. al. 2016)



Kuva 41. Naantalin koeasetelma. (Larkela et. al. 2016)

Seinän läheisyydessä oli tehty yksi painokairaus ja yksi siipikairaus, joiden etäisyys seinästä oli noin 15 metriä. Pohjamaa oli savea, jonka pinnassa oli noin 1,5 m paksu kuivakuori. Saven alla noin 5,5 metrin syvyydessä oli tiivistä hiekkaa ja moreenia. Saven leikkauslujuus siipikairauksen perusteella vaihteli välillä 14...18 kPa vesipitoisuuden ollessa välillä 47...65 %. Kuivakuoren leikkauslujuudeksi oli mitattu 50 kPa ja vesipitoisuudeksi 44 %. (Larkela et. al. 2016)



Kuva 42. Pystysiirtymämittauspisteiden sijoittelu. (Larkela et. al. 2016)

6.3.3 Mittaukset

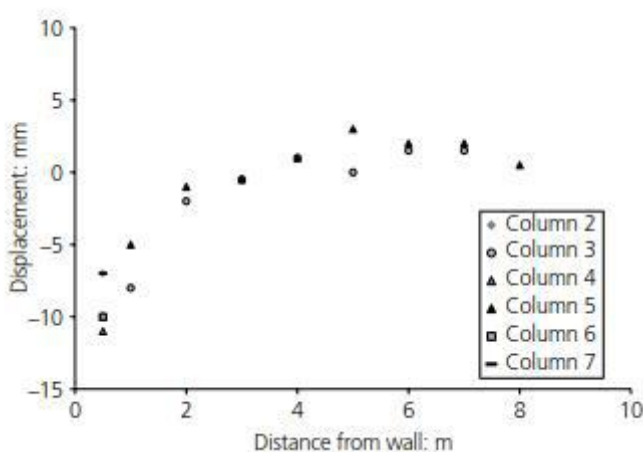
Mittausohjelma

Naantalin kokeen yhteydessä mitattiin paalujen sivuttaissiirtymiä sekä maanpinnan pystysiirtymiä. Sivuttaissiirtymät mitattiin inklinometreillä paaluista 1, 6 ja 12. Sivuttaissiirtymät mitattiin kaksi kertaa. Ensimmäinen referenssimittaus tehtiin paalujen asennuksen jälkeen ja toinen 0,5 tuntia kaivannon kaivun jälkeen.

Maanpinnan pystysiirtymät mitattiin puisilla sauvoilla, jotka olivat 0,5 m pitkiä ja halkaisijaltaan 28 mm. Sauvat lyötiin noin 0,2-0,3 m syvyyteen maahan. Mittauspisteiden sijoittelu näkyy kuvassa 42. Pystysiirtymiä mitattiin yhteensä neljä kertaa. Ensimmäinen mittaus tehtiin ennen paalujen asennusta, toinen 15 ilmahuuhdellun paalun asennuksen jälkeen, kolmas sementtihuuhdeltujen viiden paalun asennuksen jälkeen ja neljäs mittaus kaivannon kaivun jälkeen. (Larkela et. al. 2016)

Mittaustulokset

Pystysiirtymien mittauksista havaittiin, että ainoastaan 0,5 m etäisyydellä olevassa mitauspisterivistössä oli tapahtunut siirtymiä paalujen asennuksen jälkeen. Siirtymät olivat maanpinnasta ylöspäin ja välillä 15-35 mm. Muita merkittäviä siirtymiä paalujen asennuksen jälkeen ei havaittu. (Larkela et. al. 2016) Ensimmäisen rivin mitauspisteet saattoivat olla siirtyneet paalutustyön yhteydessä, joten tulokset voivat olla epäluotettavia. (Larkela 2017 sähköposti) Kaivun jälkeisissä mittauksissa havaittiin, että maanpinta oli painunut 0...11 mm 0-3 metrin etäisyydellä seinän reunasta. Nämä tulokset vastaavat karkeasti seinässä tapahtuneita poikittaissiirtymiä. Kaivun jälkeiset mitatut pystysiirtymät on esitetty kuvassa 43. (Larkela et. al. 2016)



Kuva 43. Kaivun aiheuttamat pystysiirtymät etäisyyden funktiona. (Larkela et. al. 2016)

Paaluseinässä tapahtuneet siirtymät olivat suurimmat paaluissa 12 ja 6. Paalussa 6 suurin siirtymä oli 11 mm kaivantoon päin paalun yläpäässä ja mitauskuvaajasta voidaan havaita, että paalun alapää ei ollut kiinteästi kalliossa tai tiiviissä moreenissa, sillä toi-

seksi alimmassa mittauskohdassa oli tapahtunut merkittävää siirtymää. Paalussa 12 havaittiin samankaltaisia tuloksia suurimman siirtymän ollessa 15 mm. Inklinometrit eivät olleet kiinnitetty alapäästään, joten on mahdollista, että paalujen alapääkin on siirtynyt, jolloin todelliset siirtymät ovat suurempia. (Larkela et. al. 2016)

Paalussa 1 suurimmat havaitut siirtymät olivat noin 7-10 mm ja ne mitattiin noin kahden metrin syvyydestä. Paalun siirtymäkuvaajan perusteella paalun alapää oli kiinteästi kalliolla tai tiiviissä moreenissa. Tätä havaintoa tukevat myös porausurakoitsijan havainnot tiiviistä moreenista porauksen aikana. Paalun yläpäästä mitatut siirtymät olivat pienempiä, kuin kahden metrin syvyydessä, joka johtunee mittausvirheestä tai kaivinkoneen kauhan aiheuttamasta siirtymästä poispäin kaivannosta. (Larkela et. al. 2016)

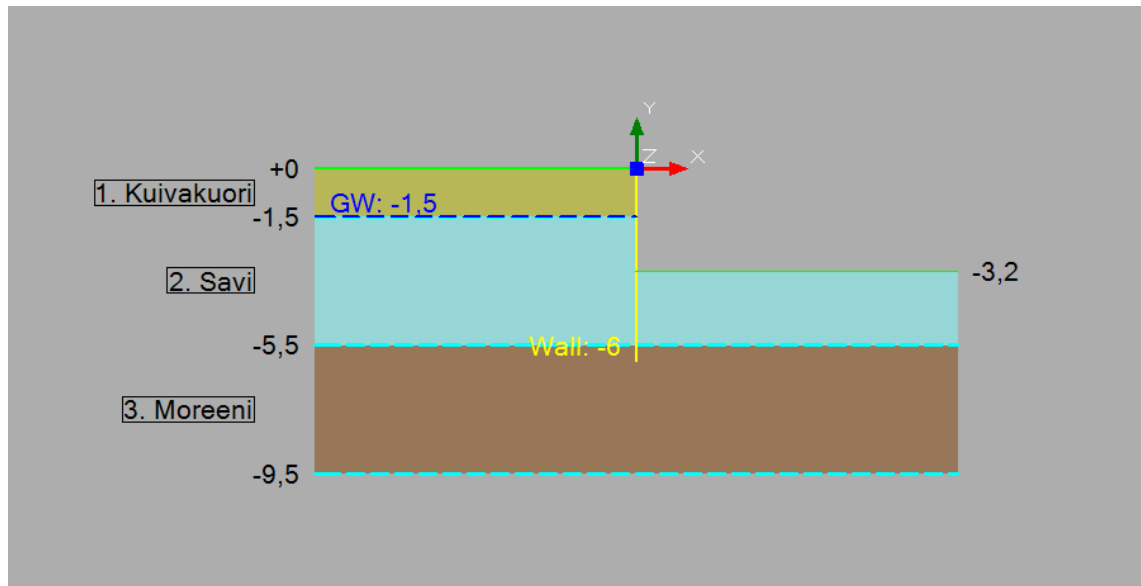
Porauksen aikaiset havainnot ja muut havainnot

Paalut 4 ja 5 eivät saavuttaneet tavoitesyvyyttään, vaan poraus keskeytyi 6,8 metrin kohdalla. Syytä tähän ei saatu varmistettua, mutta porausurakoitsijan kommentin perusteella avarrinkruunun hitsaus oli pettänyt. Porausnopeuden ja porasojista tehtyjen näköhavaintojen perusteella kyseiset paalut päätyivät kallioon tai suureen lohkareseen. Muilta osin havainnot vastasivat Keravan koetta. Naantalissa 90 % paaluista saatiin porattua ongelmitta, jonka perusteella asennustapa on toimiva saviseen maahan.

6.3.4 Siirtymämallinnus

Tämän työn yhteydessä mallinnettiin Naantalin koeseinän siirtymät GeoCalc-ohjelmalla. Laskennoissa käytetyt lähtötietoparametrit sekä laskentatulokset on esitetty liitteessä 5. Seinän jäykkyys arvioitiin kaavan 17 mukaisesti.

Maa-aineksen mallintamiseen käytettiin MCM-mallia, johon materiaaliparametrit määritettiin alueella tehtyjen kairausten, kirjallisuuden ja keskustelujen perusteella. (Jääskeläinen et. al. 1999, Ketonen 2017). Maakerrokset määritettiin pohjatutkimustietojen mukaan. Laskennat tehtiin erikseen 6 metrin ja 8 metrin mittaiselle seinämälle. Seinän laskentaparametrit määritettiin tukiseinän rakenteellisen mitoituksen teorian mukaisesti. Geometria, jota käytettiin kuuden metrin pituisen paaluseinän mallintamiseen, on esitetty kuvassa 44. Kahdeksan metrin seinämän mallinnukseen käytetty geometria on vastaava, pois lukien seinän pituus.



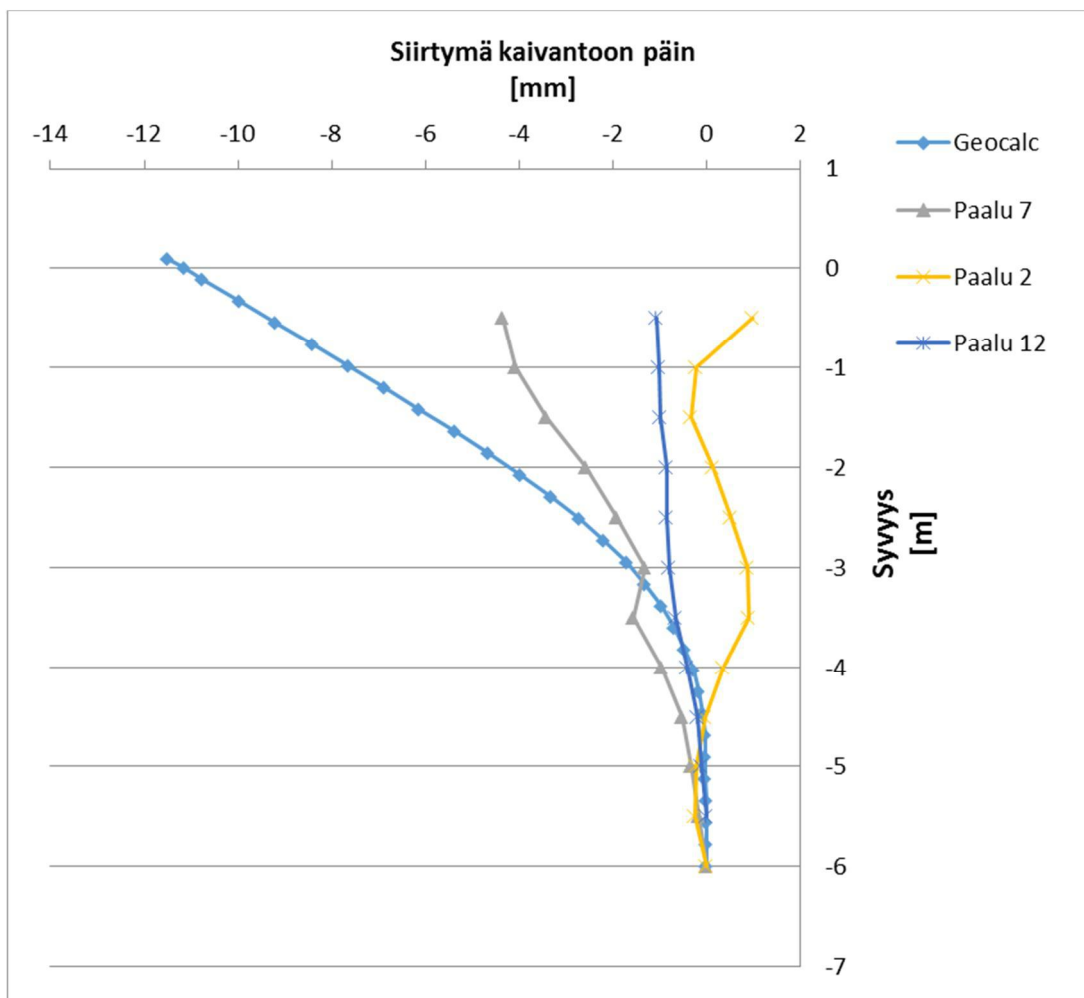
***Kuva 44.** GeoCalcissa käytetty geometria kuuden metrin mittaisen porapaaluseinän mallinnukseen*

6.4 Laskennan tulokset ja vertailu mittaustuloksiin

Seuraavissa alaluvuissa on vertailtu Naantalin ja Keravan todellisia mitattuja siirtymiä mallinnuksen tuloksiin.

6.4.1 Kerava

Siirtymämallinnuksen tulokset lopullisessa kaivussyvyydessä sekä mitatut siirtymät toisen inklinometrimittauksen jälkeen on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Keravan mitatut sekä mallinnetut siirtymäprofiilit.

Paalussa 7 ja 12 ensimmäisen 2,5 metrin osalta mittaustulokset vaikuttavat luotettavilta ja vastaavat mallinnettua siirtymäprofiilia. Paalujen ylimmän 3,5 metrin osalta mittaustulokset vaikuttavat epäluotettavilta, erityisesti paalun 2 osalta, joka on tulosten perusteella taipunut pois päin kaivannosta. Mittaustulosten perusteella vaikuttaa, että kaivun yhteydessä kaivinkoneen kauha on taivuttanut paalua 2 sekä mahdollisesti paaluja 7 ja 12. Siirtymät ovat reunimmaisissa paaluissa (2 ja 12) pienemmät, kuin keskimmaisissa paaluissa, joka johtuu kaivannon päissä vaikuttavasta päätyvastuksesta.

Siirtymämallinnuksessa oleviin epätarkkuuksiin voi olla useita syitä, esimerkiksi seuraavat:

- Paalut olivat mahdollisesti siirtyneet kaivantoon päin juurestaan lähtien, jolloin mitatut siirtymät eivät kuvaa kokonaissiirtymää.
- Porapaaluseinän päädyissä vaikuttaa maa-aineksen leikkauslujuudesta johtuva päätyvastus, joka pienentää todellista maanpainetta.
- Inklinometrimittaukset tehtiin lyhyen ajan kuluttua kaivun jälkeen, jonka takia siirtymät eivät hienorakeisessa maa-aineksessa ehtineet tapahtua kokonaisuudessaan.

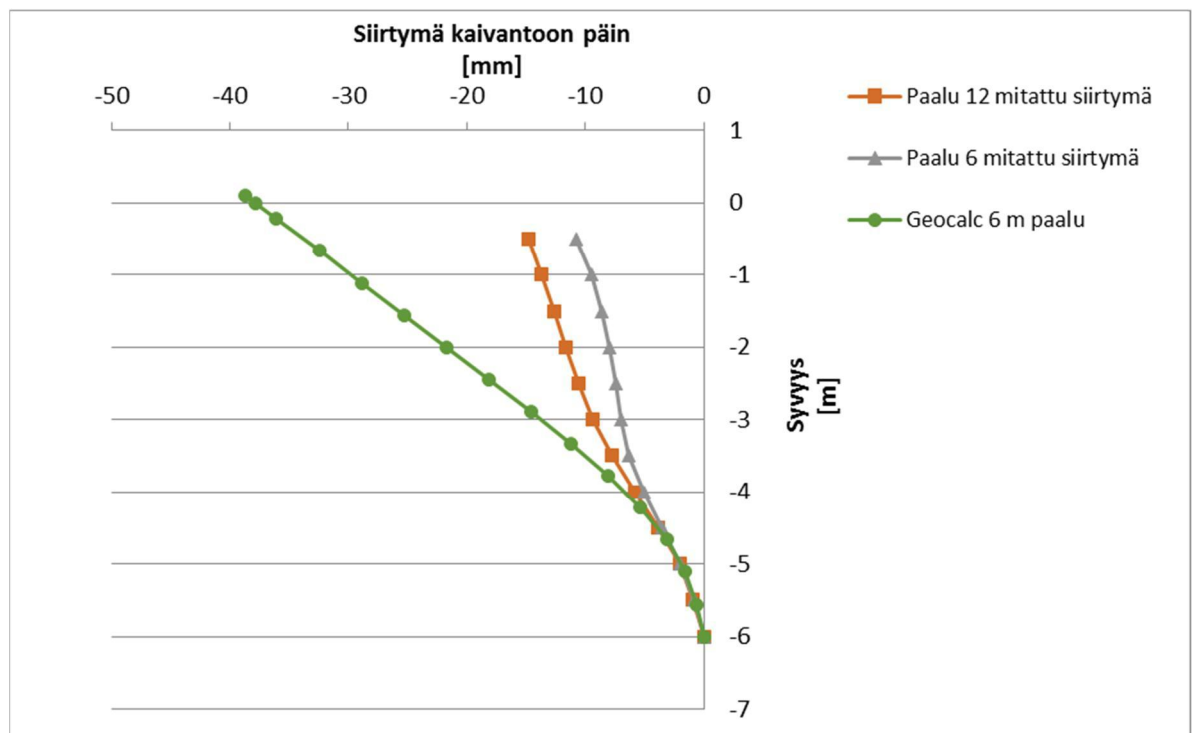
- Maa-aineksen laskennassa käytettävissä materiaaliparametreissa on käytännössä aina epätarkkuutta (Knuuti 2015).

6.4.2 Naantali

Siirtymämallinnuksen tulokset lopullisessa kaivussyvyudessa on eritelty kahteen kuvaajaan, joista toisessa on kuuden metrin porapaaluseinän mallinnustulokset (kuva 46) ja toisessa kahdeksan metrin (kuva 47). Siirtymämallinnuksen tavoitteena oli tutkia, vastaavatko seinässä todellisuudessa tapahtuneet mitatut siirtymät mallinnettuja siirtymiä.

Naantalin koeasennuskohteessa epätarkkuutta mallinnukseen aiheuttaa, että seinä ei ole koko matkaltaan rakennettu samanmittaisista paaluista ja sementtihuuhdeltujen paalujen neliömomentti eroaa ilmahuuhtelun avulla porattujen paalujen neliömomentista, sillä kovettunut sementti kasvattaa paalujen pinta-alaa sekä taivutusjäykkyyttä, joskin Larkelan (2016) mukaan sementti ei ollut levinnyt paalujen ympärille luultavasti liian pienen injektointipaineen takia.

Lasketut siirtymät kahdeksan metrin porapaaluseinässä ovat suurempia, kuin todellisuudessa tapahtuneet pois lukien siirtymät syvyysvälillä -3,5...-7,0 m. Laskennallinen siirtymäprofiili on muodoltaan vastaava mitattuun siirtymään pois lukien paalun yläpäästä mitatut siirtymän arvot, joissa epäiltiin (Larkela et. al. 2016) olevan mittausrvirhe tai kaivinkoneen kauhan siirtäneen paalujen yläpäitä.

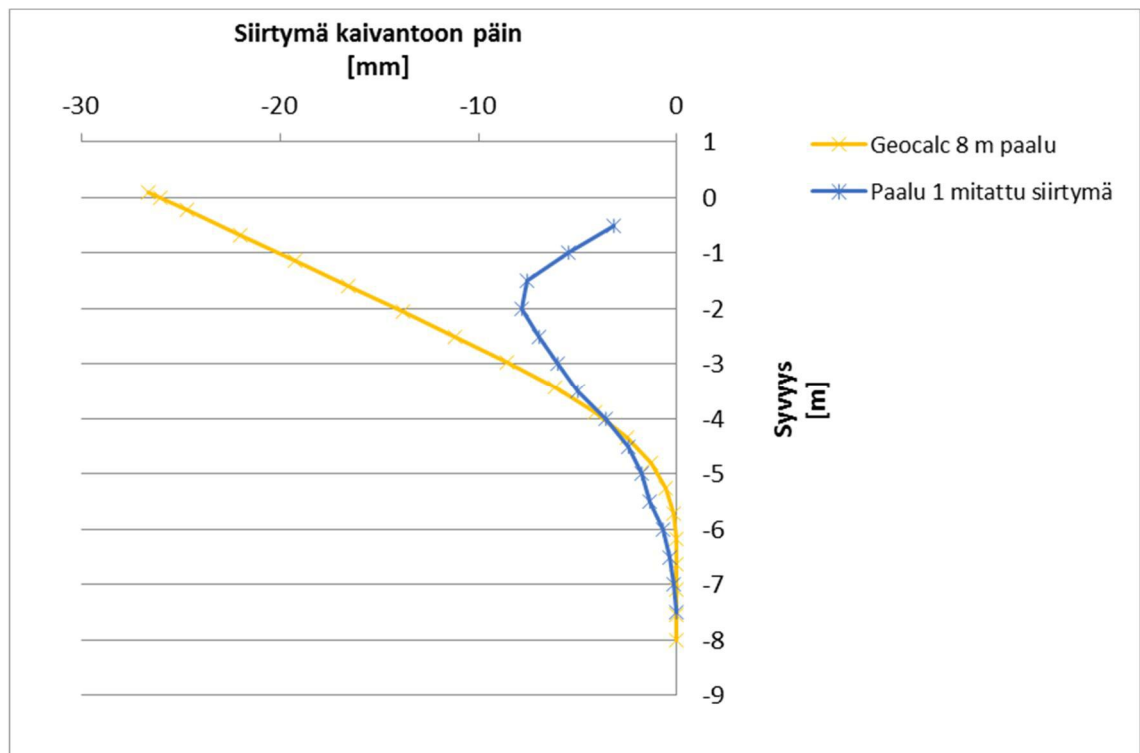


Kuva 46. Mitatut sekä laskennalliset siirtymät porapaaluseinässä kahdeksan metrin paaluissa.

Kuuden metrin porapaaluseinässä laskennalliset siirtymät ovat suurempia, kuin mitatut siirtymät. Laskennan epätarkkuuteen voi olla syynä useita tekijöitä, kuten seuraavat:

- Pidemmät paalut ovat jäykistäneet rakennetta siten, että mallinnustilanne ei vastaa todellista.
- Paalut olivat mahdollisesti siirtyneet kaivantoon päin juurestaan lähtien, jolloin mitatut siirtymät eivät kuvaa kokonaissiirtymää.
- Porapaaluseinän päädyissä vaikuttaa maa-aineksen leikkauslujuudesta johtuva päätyvastus, joka pienentää todellista maanpainetta.
- Inklinometrimittaukset tehtiin lyhyen ajan kuluttua kaivun jälkeen, jonka takia siirtymät eivät hienorakeisessa maa-aineksessa ehtineet tapahtua kokonaisuudessaan.
- Maa-aineksen materiaaliparametreissa on käytännössä aina epätarkkuutta (Knuuti 2015).

Laskennallinen siirtymäprofiili ei täysin vastaa mitattua, mutta mallinnustuloksissa paalujen siirtymä tapahtuu juuresta alkaen, kuten mittaustuloksissakin.



Kuva 47. Mitatut sekä laskennalliset siirtymät porapaaluseinässä kuuden metrin paaluissa.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Yleistä

Porapaaluseinä valitaan vaihtoehdoksi monesti kohteissa, joissa maaperä on tiivis tai karkearakeinen, jolloin ponttiseinää ei saada ulotettua riittävään syvyyteen riittävällä varmuudella. Ponttiseinää voidaan edelleen käyttää tällaisissa kohteissa tekemällä löyhennysporaus, mutta tämä menetelmä aiheuttaa ylimääräisen työvaiheen, joka lisää kuluja, ja lisäksi vaikutuksia on vaikea arvioida, eli löyhennysporauksen jälkeen ponttiseinän saavutettavaa upotussyvyyttä on vaikeaa arvioida. Tästä syystä erityisesti kohteissa, joissa on tärkeää pysyä aikataulussa, suunnittelussa pyritään minimoimaan aikataulullinen riski ja päädytään varmempaan ratkaisuun, eli porapaaluseinään. Esimerkki tällaisesta kohteesta on rata-alueelle tehtävä tukiseinä, jonka takia radan liikenne joudutaan katkaisemaan.

Porapaaluseinää käytetään myös usein kohteissa, joissa kaivannon tukiseinältä vaaditaan mahdollisimman suurta vedenpitävyyttä, sillä se on halvempi vaihtoehto verrattuna muihin, hyvin vettä pitäviin ratkaisuihin, kuten patoseiniin. CT-porapaaluseinän vedenpitävyyttä ei olla tutkittu, mutta se voidaan tiivistää käyttämällä ilma- tai vesihuuhtelun sijaan sementtihuhtelua, jolloin sementti muodostaa ikään kuin kuoren paalun ympärille. Tukiseinää on käytännössä mahdotonta saada täysin vedenpitäväksi, varsinkin syvissä kaivannoissa, joissa vedenpaine-ero seinän eri puolilla on suuri. Ottaen huomioon CT-porapaaluseinän paalujen pienehköt halkaisijat ja tämän myötä pienet taivutusjäykkyydet, CT-porapaaluseinällä tuettujen kaivantojen ei ole taloudellisesti kannattavaa olla kaivussyvyydeltään kovin suuria. Tästä syystä myöskään vedenpaine-erot eivät kasva valtaviksi, jolloin seinämä on helpompi tiivistää.

CT-porapaaluseinä kaivannon tuennassa on parhaimmillaan haastavissa maaperäolosuhteissa. Tällaisia ovat esimerkiksi kohteet, joissa on tehty epämääräisiä täyttöjä tai tilanteissa, jolloin tukiseinä tulee ulottaa syvälle tiiviiseen pohjamoreeniin. Tuentatavan valinnassa erityisvaatimuksia asettavassa kohteessa ei ole olemassa yhtä oikeaa ratkaisua, vaan suunnittelu on enemmänkin optimointia eri vaihtoehtojen välillä. Tällöin suuressa roolissa on myös suunnittelijan tieto käytettävissä olevista vaihtoehdoista, jonka takia tärkein asia uuden tuotteen markkinoille tuonnissa on saattaa tieto sen olemassa olostu suunnittelijalle sekä antaa tarkkaa tietoa sen ominaisuuksista ja kohteista, joissa sitä on käytetty. Taulukossa 8 on esitetty eri tuentatyyppien ominaisuuksia erilaisten vaatimusten perusteella. Johtopäätöksiä yksittäisistä käyttökohteista on esitetty luvussa 7.2.

Taulukko 8. Tukiseinätyyppien soveltuvuus kohteen vaatimusten mukaan. (mukaillen Kärki 2010)

Seinätyyppi	Maaperä			Vesitiiviys ja jäykkyys		Ympäristön aset- tamat vaatimukset			Syvät kaivannot	Rakentamisaika ja kes- toikä			Osana lopullista rakennetta	Uusiokäyttömahdollisuus
	Pehmeä ko- heesiomaa	Homogeeninen kitkamaa (esim. hiekkä, sora)	Heterogeeninen karkea kitkamaa (esim. moreeni)	Vaaditaan vesitiivi- yttä	Suuri jäykkyystarve (esim. pienet sallit- ut siirtymät)	Melu ja värinä	Ympäristön pai- numat	Pienet työtilat		Pysyvä seinä	Työnaikainen Seinä	Lyhyt rakentamis- aika		
Settiseinä	-	X	X ¹	-	-	- ²	-	-	X	-	O	-	-	O
Teräsponttiseinä	O	O	-	X	-	- ²	X	-	X	X ³	O	O	X	O
Combi-seinä	O	O	-	X	X	- ²	X	-	O	O ³	-	O	O	O
Suihkupaalusei- nä	X	O	X	O	O	O	O	O	X	X	O	-	O	-
Kaivinpaalusei- nä	O	O	X	O	O	O	O	-	O	O	-	-	O	-
Kaivantoseinä	O	O	X	O	O	O	O	-	O	O	-	-	O	-
CT- porapaaluseinä	O	O	O	X	X	O	X	O	X	O	O	-	O	O

O: Soveltuu käytettäväksi

X: Soveltuu varauksella

-: Ei sovellu käytettäväksi

1. Käytettäessä erikoisporaus- ja lyöntikalustoa

2. Melua ja värinää voidaan vähentää käyttämällä erikoiskalustoa

3. Korroosiovara huomioitava

CT-paalujen tuotannolliselta kannalta tärkeää tietoa ovat myös paalujen pituusvaihtoehdot. Tukiseinänä käytettäessä seinämän ulotussyvyyden määrittävät tekijät on esitelty alaluvussa 2.4. Tämän johdosta pohjoismaisissa jääkauden aiheuttamissa maaperäolosuhteissa tukiseinän ulotussyvyys voi vaihdella runsaasti ollen jopa kymmeniä metrejä. Upotussyvyys on siis täysin suunnittelukohteen pohjaolosuhteista sekä kaivannon syvyydestä riippuvainen. Upotussyvyyden määrittää suunnittelija pohjatutkimustietojen perusteella.

7.2 Käyttökohteet

Lämpöä eristävää seinää on tutkittu tässä vaiheessa varsin vähäisissä määrin, joten sen hyödyntämisestä ei ole olemassa vielä kokemuserää. Aalto-yliopistolla tehdyn mallinustutkimuksen perusteella eristeseinä vaikutti maa-aineksen lämpötilaan seinän lähellä noin 1,5-3,5 °C. 15 metrin etäisyydellä seinämästä vaikutusta lämpötilaan ei ollut. Vaikutus pieneni etäisyyden maanpinnasta kasvaessa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan huomioitu paalujen mekaanisia ominaisuuksia, eikä hydrologian vaikutusta tulokseen. Molemmat voivat vaikuttaa lopputulokseen. (Cervera et. al. 2014) Tämän takia on suositeltavaa tutkia mahdollisuutta hyödyntää lämpöä eristävää seinää käytännössä, sillä potentiaali tekniikalla on suuri energiatalouden parantamiseen. CT-porapaaluseinä on ominaisuuksiltaan hyvä tähän käyttöön, sillä lämpöä eristävään seinään ei kohdistu suuria taivutusmomenteja, jolloin pienen halkaisijan paalut porapaaluseinässä ovat järkevä ratkaisu.

CT-porapaalun käyttäminen pilaantuneiden maiden eristämiseen on mahdollista, joskin vesitiiviysvaateen takia lisätutkimukselle on tarve. Sementtihuuhdeltua hyödyntäen tämä on teoriassa mahdollista, mutta tutkimusta aiheesta ei ole tehty.

Suuri osa rakentamisesta tehdään nykyään kaupunkiympäristössä, jossa rakennettu ympäristö asettaa erilaisia vaatimuksia maanpinnan alapuolelle rakentamisen yhteydessä tehtäville tukiseinille. Tärkein näistä vaatimuksista on tavallisesti se, että ympäröivään rakennuskantaan ei saa aiheuttaa siirtymiä. Siirtymät voivat aiheutua joko tukiseinässä tapahtuvista sivuttaissiirtymistä, jolloin maa-aines siirtyy kaivantoon päin ja voi aiheuttaa ongelmia ympäröiviin rakennuksiin ja infraan, tai pohjavedenpinnan laskusta, joka aiheuttaa painumia ympäristöön. Seinän jäykkyys on tärkein ominaisuus seinän sivuttaissiirtymien yhteydessä, sillä siirtymän suuruus riippuu seinän taivutusjäykkyydestä, eli kuinka suuri siirtymä seinässä tapahtuu siihen kohdistuvan taivutusmomentin vaikutuksesta. Pohjavedenpinnan lasku voi tapahtua, mikäli kaivantoon virtaa suuri määrä pohjavettä seinän läpi tai sen alta, eli tässä yhteydessä seinän vesitiiviys on tärkeä ominaisuus.

Toinen tärkeä ominaisuus rakennetussa ympäristössä on sijainnin tarkkuus asennettaessa tukiseinää, varsinkin kohteissa, joissa ympäröiviä rakenteita on perustettu syvälle

maanpinnan alapuolelle ja kaivanto on hyvin lähellä perustuksia. Porapaalun asennustarkkuus on hyvä verrattuna ponttiseinään. CT-porapaaluseinä on siis käyttökelpoinen vaihtoehto kohteissa, joissa pohjamaa aiheuttaa ponttiseinän asentamiseen ongelmia tai vaaditaan suurta sijaintitarkkuutta. Sijaintitarkkuudessa tosin havaittiin ongelmia koe-asennuksen yhteydessä ja sitä on syytä tutkia enemmän. Taivutusjäykkyys asettaa rajoituksia kaivantojen syvyyden suhteen, erityisesti kaupunkiympäristössä, jossa siirtymien tulee olla pieniä. Tästä syystä kohteiden tulee olla sellaisia, joissa ei vaadita raskasta tuentaa.

Tukiseinä voidaan käyttää osana lopullista rakennetta, kun rakennetaan maanpinnan alapuolelle. Tällaisissa tilanteissa porapaalu on hyvin optimaalinen rakenne, sillä tällöin voidaan hyödyntää porapaaluseinän kykyä ottaa vastaan pystysuuntaisia voimia. Huomioon on otettava seikka, että paalun yläpäässä, josta maa on kaivettu pois kaivannon puolelta, yleensä tarvitaan nurjahdustuenta paaluille, kun maanpaine ei tue paalua kaivannon sisäpuolelta. Lisäksi aktiivimaanpaine aiheuttaa epäkeskisyyttä kuormaan. Esimerkkeinä tällaisista käyttökohteista ovat muun muassa talot, jotka sijaitsevat savikolla ja joissa on maanalainen kellari, mutta kellarin aiheuttama kevenne rakenteessa ei riitä estämään painumia tai vaihtoehtoisesti syvät hissikuilut, joiden yläpäässä on jonkinlainen katettu rakennus.

Useasta yksittäisestä CT-paalusta voidaan muodostaa yksi suurpaalu, jota voidaan käyttää suurten rakenteiden perustamiseen. Tärkeimmät kaksi hyvää puolta useasta mikropaalusta tehdyssä suurpaalussa ovat paalujen kuljetuksen helppous sekä käytännössä rajoittamaton paalun halkaisija. Suurpaalujen varaan perustetaan muun muassa tuuli-voimaloita sekä siltoja. Erityisesti rakennusalueille, joille on hankalaa kuljettaa yksittäisiä suurpaaluja, ratkaisuna useammasta mikropaalusta rakennettu suurpaalu on looginen vaihtoehto.

Eri käyttökohdevaihtoehtoja on kartoitettu myös muun muassa Turun ammattikorkeakoulun opiskelijoiden toimesta (Lehtonen et. al. 2014), jossa ehdotettiin muun muassa monien kevyiden rakenteiden perustamista (esim. liikennemerkkit, aidat, talon kuistin pilari) yksittäisellä C-paalulla sekä paalun käyttämistä ankkurina, maanaulana tai salaojana. Kohteissa, joissa käytetään yksittäistä C-paalua, voidaan saavuttaa säästöjä kuluissa ja materiaalissa, sillä C-paalun poraamisessa voidaan käyttää epäsymmetristä avarrinkruunua. CT-porapaaluseinän porauksessa sen sijaan kyseistä kruunua ei voida käyttää.

Kuten jo edellä todettiin, käyttötarkoituksia on olemassa lukuisia, mutta tärkeintä on saada tieto tuotteesta suunnittelijoille, jotka tekevät alkuperäisen ehdotuksen kaivannon tuenta- tai rakenteiden perustamistavasta.

7.3 Asennettavuus karkearakeisiin kitkamaihin

Keravan koeasennuksessa poratuista 12 paalusta kaikki ulottuivat moreeniin noin 1,5 metrin matkalta. Myös Naantalissa tehdyssä testissä paalut ulottuivat osittain moreeniin. Naantalissa maakengän kiinnityksessä havaittiin ongelmia, mutta vastaavanlaisia ei koettu Keravan koeasennuksessa. Naantalissa epäiltiin hitsausten pettäneen paalun ja maakengän välissä. Tehtyjen näköhavaintojen perusteella paalujen asentaminen tiiviiseen pohjamoreeniin onnistui ongelmitta.

Keravan koeasennuksen mittaustuloksista havaittiin, että porapaaluseinän asennussuuntaan edetessä paalut asentuivat seinän suunnassa vinoon, eli seinä alkoi ikään kuin ”kaataa”. Seinän suoruutta etenemissuunnassa ei mitattu Naantalissa. Seinän vinoutuma johtuneen avoimesta pontista, joka ei ohjaa porapaaluja poratessa samaan tapaan, kuin RD-porapaaluseinässä oleva perinteinen ponttilukko. Jotta porapaaluseinä saataisiin asentumaan suoraan, konstruktiota on syytä kehittää. Seinässä oli epäsuoruutta myös ylhäältä päin katsoen, mutta tämä voitaneen välttää käyttämällä asennusmuottia tai -ohjuria. Ohjureita on käytetty esimerkiksi RD-porapaaluseinäkohteissa.

7.4 CT-porapaaluseinän uusiokäyttö

Infra-alalla 2000-luvulla tapahtuneista 50 kuolemasta kaivanto-onnettomuuksien yhteydessä tapahtuneita on seitsemän kappaletta. Suuri osa kaivanto-onnettomuuksista tapahtuu kapeissa ja suhteellisen matalissa kaivannoissa, kuten vesi- tai kaukolämpöjohdon rakennuskaivannoissa. Suunnittelijoiden kokemuksen mukaan onnettomuudet johtuvat suurelta osin joko vajaista lähtötiedoista suunnitelmissa, jolloin joudutaan tekemään vain tuennan periaatesuunnitelma tai urakoitsijan huonoista toimintatavoista. Onnettomuuksien välttämiseksi alalla on tehty tutkimusta ja työtä, jonka ansiosta asenteet kaivannon tuentasuunnitelmia kohtaan ovat kuitenkin kehittyneet turvallisempaan suuntaan. (Rantanen et. al. 2013) Kevyiden kaivantojen tuentaan olosuhteissa, joissa ponttiseinä ei ole käyttökelpoinen, käytetään tuentaan lähinnä tukielementtejä. Niiden käyttöön vaikeuksia kuitenkin aiheuttavat elementtien koot, jotka rajoittavat kaivannon kokoa. Ne ovat ongelmallisia myös hydraulisen murtuman ja nosteen aiheuttaman pohjanousun kannalta, sillä elementtejä ei uloteta kaivutasoa alemmas. Tällöin riskikohteissa käytännössä ainoa vaihtoehto on alentaa pohjavettä. Myös kestävä kehitys ja materiaalihävikin minimointi ovat rakentamisalalla hyvin ajankohtaisia aiheita (Kaurahalme 2016). Näistä syistä CT-paalujen uusiokäytöllä kaivannon tuennassa on suuri potentiaali. Paalujen uusiokäyttömahdollisuuteen vaikuttaa kolme asiaa:

- Paalujen vaurioituminen asennuksen ja nostamisen yhteydessä
- Paalujen halkaisijan muutokset
- Avarrinkruunun kulumisen

Keravan koeasennuksessa paalujen noston yhteydessä havaittiin, että paaluja ei saatu nostettua kaivinkoneen voimalla, sillä avarrinkruunu oli todennäköisesti kiilautunut karkeaan maa-ainekseen. Tärinäavusteisella pontinasennuslaitteilla paalut saatiin nostettua ongelmitta, mutta paalut vaurioituivat laitteen tarttumakohdasta tartunnan puristusvoiman johdosta. Tämä voidaan välttää esimerkiksi hitsaamalla paaluihin tarttumarauta, jolloin puristus kohdistuu tarttumarautaan, eikä vaurioita paaluja. Paalujen halkaisija muuttui siltauksen poiston yhteydessä alle 3 mm, joka ei vielä ylitä avarrinkruunun ylikokoa. Nostettujen paalujen uudelleenasetusta ei kuitenkaan testattu kokeen yhteydessä.

Avarrinkruunun porausnastoista mitatut kulumat yhden porauskerran jälkeen olivat keskimäärin 0,63 mm. Tämän perusteella esimerkiksi kymmenen porauskerran jälkeen kuluma on teoreettisesti suoraviivaisesti laskettuna noin 6,3 mm, joka on noin 4,2 % kokonastan halkaisijasta. Tämän perusteella avarrinkruunun nastat eivät ole este uusiokäytölle. Kuitenkin ottaen huomioon, että mittaukset tehtiin vain yhden asennuskerran jälkeen, ne eivät ole riittävän edustavat, jotta voitaisiin vetää johtopäätös, että kuluma jatkuisi suoraviivaisesti usean porauskerran aikana.

Estettä porapaalujen uusiokäytölle ei havaintojen perusteella ole, mutta koeasennus jätti joitain asioita avoimeksi, koska paalujen uudelleenasetusta ei ole testattu.

7.5 Siirtymämallinnus

Siirtymämallinnuksesta saadut laskennalliset siirtymät olivat huomattavasti suurempia, kuin todellisuudessa tapahtuneet. Syitä mallinnuksen epätarkkuuteen ovat muun muassa seuraavat:

- Epätarkkuudet maan materiaaliparametreissa
- Koeseinämien lyhyt mitta, joiden takia kaivannon päätyvastukset pienensivät todellisia siirtymiä
- Kaivannot olivat auki lyhyen aikaan, jonka takia täydellistä maa-aineksen sortumaa seinän taustalla ei välttämättä päässyt tapahtumaan, jolloin maanpaine ei muodostu niin suureksi, kuin laskennassa

Mallinnustulosten perusteella Naantalin ja Keravan koeasennuksissa asennetuissa koeseinissä ei tapahtunut epäjohtonmukaisen suuria siirtymiä. Tulosten perusteella ei kuitenkaan voida vetää tarkempia johtopäätöksiä johtuen suuresta epätarkkuudesta.

7.6 Jatkotutkimusehdotukset

Tutkimuksen tulosten perusteella CT-porapaalun kehittämiseksi ja tuotteistamiseksi tulee paalujen ominaisuuksia edelleen tutkia. Tärkeimpinä asioina suunnittelijan näkökulmasta ovat paaluseinän vedenpitävyys, paalujen kärkekantavuus sekä paalujen raken-

teelliset mitoitusparametrit. Lisäksi on syytä tutkia laskennallisia siirtymiä täysikokoisen maanpaineseinän tapauksessa. Paalujen asennuksen suhteen tärkeimmät kehityskohdet ovat asennuksen yhteydessä paalujen sijaintipoikkeamien ja pystysuoruuden parantaminen. Uusiokäytön suhteen tulee tutkia paalujen poraamista useampaan kertaan sekä kehittää tekniikkaa, jolla paalut saadaan nostettua vaurioittamatta paaluja.

Edellä mainittujen lisäksi tärkeää on saada paaluvaihtoehdosta tietoa suunnittelijoille ja rakentajille sekä käyttää paalua referenssiprojekteissa, joista saadaan myös lisää tutkimustietoa. Hyödyllistä olisi myös tuottaa suunnitteluohje, joka pienentää kynnystä ja helpottaa paalun käyttöä suunnitteluratkaisuissa.

8. YHTEENVETO

Tutkimuksen päätavoitteina oli selvittää CT-porapaaluseinän potentiaalisia käyttökohteita, suunnittelun periaatteita ja millaisia vaatimuksia se asettaa käyttökohteissa sekä CT-porapaalun käytettävyyttä karkearakeisissa kitkamaissa ja uusiokäytön mahdollisuutta kenttäkokein. Lisäksi tavoitteena oli mallinnuksen keinoin verrata laskennallisia siirtymiä työn yhteydessä tehdyssä Keravan koeasennuksessa sekä aiemmin tehdyssä Naantalin koeasennuksessa havaittuihin siirtymiin.

Tutkimuksessa tehtiin kirjallinen tutkimus kaivannon toiminnallisesta suunnittelusta sekä mitoittamisesta. Kaivannon toiminnallinen suunnittelu sisältää kaivantotyyppin valinnan, eli tehdäänkö kaivanto luiskattuna vai tuettuna, sekä tuennan tullessa kyseeseen, tuentatyyppin valinta. Kaivannon mitoittaminen sisältää luiskaustapauksissa luiskakaltevuuden määrittämisen ja käytettäessä tuentaa, tukien upotussyvyyden valinnan, kaivannon kuormituskestävyyden sekä siirtymämitoituksen.

Tuetun kaivannon tuentatavan valinnan tärkein lähtökohta on kaivannon turvallisuus, mutta suunnittelijat pyrkivät samalla mahdollisimman taloudellisiin ratkaisuihin. Useasti ponttiseinä on tällöin järkevin vaihtoehto sen asennusnopeuden, verrattain suuren taivutusjäykkyyden sekä halvan hinnan johdosta. Käytännössä kaivannoissa, joissa pohjaolosuhteet ovat tukiseinän asennuksen kannalta helpot, eikä ympäristö aseta suuria vaatimuksia, ponttiseinä on tavanomainen suunnitteluratkaisu. Eri tuentavaihtoehdot tulevat kyseeseen siinä vaiheessa, kun kohde asettaa erityisvaatimuksia tuennalle, kuten vesitiiviys, vaikeat pohjaolosuhteet asennuksen kannalta, aikataulun tarkkuus, asennustarkkuus tai siirtymien minimointi rakennetun ympäristön takia. Tällaisissa kohteissa erityisesti pohjoismaissa monesti käytetty vaihtoehto on porapaaluseinä.

CT-porapaalu on verrattain uusi innovaatio. Se on saman tyyppinen ratkaisu, kuin RD-porapaaluseinä, mutta porapaalujen liitos toisiinsa on erilainen verrattuna RD-seinään. RD-porapaaluseinässä käytettävän perinteisen uros-naarasponttiliitoksen sijaan CT-seinän yksittäiset paalut liitetään toisiinsa paalun avoimen, C-muotoisen profiilin, ja paaluun kiinnitetyn T-profiilin avulla. CT-porapaaluseinämän yksittäisten paalujen liitostekniikka mahdollistaa ylikooltaan pienemmän avarrinkruunun käytön paalujen asennuksessa, joka mahdollistaa pienen paalukoon. Verrattuna RD-porapaaluseinään, CT-porapaaluseinä on siis kevyt ratkaisu, joskin käyttökohteiden pohjaolosuhteet maaperän osalta ovat toisiaan vastaavat. RD-porapaaluseinää käytetään myös monesti tukiseinänä kohteissa, joissa vaaditaan suurta taivutusjäykkyyttä.

Työssä tehtiin kirjallinen tutkimus yksittäisistä mahdollisista kohteista, joissa CT-porapaalu voisi olla hyvä vaihtoehto. Näiden osalta selvitettiin niiden suunnitteluperiaatteita sekä erityispiirteitä, joita kohde asettaa CT-porapaalulle. Työssä käsiteltyjä kohteita ovat maalämpöä eristävä seinämä, pilaantuneiden maiden eristysrakenteet, lisärakentaminen maan alle rakennetussa ympäristössä, satamarakentaminen, tukiseinä lopullisena kantavana rakenteena sekä suuret liittorakennepaalut useasta CT-paalusta. Edellä mainituista CT-porapaalu on tutkimuksen perusteella sopiva ratkaisu, kun seinää kuormittavat voimat eivät muodostu liian suuriksi.

Työn yhteydessä tehdyssä kenttäkokeessa tutkittiin paalun asennettavuutta karkearakeisiin kitkamaihin. Asennus tehtiin maaperään, jossa paaluista 1-2 m ulottui pohjamoreeniin. Kokeen perusteella moreeni ei aiheuttanut ongelmia paalujen asennukseen. Uusiokäytön näkökulmasta tutkittiin paalujen ylösnostomahdollisuutta sekä avarrinkruunun porausnastojen kulumia. Paalujen ylösnoston työtekniikassa havaittiin ongelmia, sillä osa paaluista vaurioitui nostovaiheessa. Nastojen kulumat mahdollistavat tutkimuksen perusteella uusiokäytön, mutta mittaustietoa kulumista on vain yhden porauskerran jälkeen.

Työssä tehtiin siirtymämallinnus kahdelle eri kohteelle. Ensimmäiset kaksi kohdetta olivat työn yhteydessä tehty Keravan koe ja aiemmin Naantalissa tehty koe. Siirtymämallinnuksen perusteella siirtymät olivat suuremmat, kuin todelliset mitatut siirtymät. Virheet mallinnuksessa aiheutuivat suurimmalta osin koeseinämien pienestä koosta sekä materiaaliparametrien epätarkkuudesta. Siirtymämallinnuksen tuloksia verrattaessa mitaustuloksiin ei havaittu mitatuissa siirtymissä olevan suuria epäjohdonmukaisuuksia eikä odottamatonta käyttäytymistä.

LÄHTEET

Ahomies, M. (2015). Kallioon injektoitu ja ankkuroitu porapaalu. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

ArcelorMittal. (2017a) U-Sections. Saatavissa:
<http://sheetpiling.arcelormittal.com/page/index/name/usections>

ArcelorMittal. (2017b). Combined wall with tubular pipes. Saatavissa:
<http://sheetpiling.arcelormittal.com/page/index/name/tubular-piles>

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. & Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook, John Wiley & Sons.

Carles Pérez Cervera, Jouko Lehtonen & Maarit Järvinen (2014). Micropile wall - An option to develop energy barriers, Proceedings of International Workshop on Micropiles 2012.

Euroopan Unioni (2014). Energia - Kestävää, luotettavaa ja kohtuuhintaista energiaa eurooppalaisille. Euroopan unioni, Luxemburg.

Hautamäki, J. (2014). CT micropiles in construction of underpasses. Projektiraportti – julkaisematon. Turun ammattikorkeakoulu.

Isohaka, J. (2015). Teräksisen suurpaalun rakenteellinen toiminta siltarakenteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere

Jeltsch, U. (1990). Saastuneiden maa-alueiden kunnostus. Vesi- ja ympäristöhallitus,

Jääskeläinen, R. (2011). Geotekniikan perusteet, 3. p. ed. Tammertekniikka, Tampere,

Kaurahalme, T. (2016). Megatrendien vaikutus tulevaisuuden työympäristöihin, hankkeeseen ja toimitilakehittämiseen, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere

Kerokoski, O. (2017). Puupaalujen kunnan tutkiminen. Luentomoniste kurssista RAK-23530 Perustusten vahvistaminen, Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

Ketonen, R. (2017) Henkilökohtaiset keskustelut. Diplomi-insinööri, projektipäällikkö, Pöyry Finland oy

Korhonen, O. & Fischer, K. Niemi, O. & Timonen, E. (1986). RIL 166 Pohjarakenteet, luku 17 kaivannot, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki.

- Kärki, I. (2017). Henkilökohtaiset keskustelut ja sähköpostiviestit, Diplomi-insinööri, Asiantuntija, kaivantojen mitoitus, Pöyry Finland Oy, Keskustelu 1.8.2017.
- Kärki, I. & Ruohonen, E. (2014). PKTO-14 Putkikaivantojen suunnitteluohje Espoo, Espoon Tekninen keskus/Geotekniikkayksikkö, Espoo.
- Kärki, T. (2010). Syvien kaivantojen maanpaineseinät, Diplomityö, Aalto-yliopisto, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Espoo.
- Laakso, J. (2014). CT micropiles in construction of large diameter piles, Projektiraportti – julkaisematon, Turku University of Applied Sciences.
- Larkela, L. (2017). Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu.
- Larkela, L., Lehtonen, J. & Korkiala-Tanttu, L. (2016). Testing of open section drilled C-pile and CT-pile wall, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, Vol. 170(2), pp. 129-136.
- Lehtonen, J. (2013). Drilled pile technology in retaining wall construction and energy transfer.
- Lehtonen, J., Laaksonen, J. & Hautamäki, J. (2014). Student's visions on micropile wall applications: how to construct a large diameter pile or an underpass.
- Leino, R. (2015). Tuulivoimalan kallioankkuroitu perustus, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere.
- Leppänen, H. (2008). Paalutuksesta ja pontituksesta aiheutuva värinä, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere.
- Liikennevirasto (2017). Eurokoodin soveltamisohje - Geotekninen suunnittelu - NCCI 7, Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 21.4.2017. Liikenneviraston ohjeita 13/2017.
- Liikennevirasto (2012). Sillan Geotekninen suunnittelu, Sillat ja muut taitorakenteet. Liikenneviraston ohjeita 11/2012.,
- Lotvonen, S., Viitala, J., Jokiniemi, H. & Eronen, S. (2005). Tuulivoimalan porapaalu-perustus, Teräspaalupäivät. Luentomateriaali, 17.11.2005, Helsinki.
- Miettinen, L. (2014). The rotational stiffness and watertightness of RD pile walls in the bedrock and pile interface, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere.
- Ou, C. (2006). Deep excavation: Theory and practice, CRC Press, Netherlands.

Penttinen, R. (2001). Maaperän ja pohjaveden kunnostus - yleisimpien menetelmien esittely.

Pålkommissionen. Rapport, 1. (2010). Borrade stålörspålar. Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll, Linköping.

Rantamäki, M. & Tammirinne, M. (1996). Pohjarakennus 465, Otatieto, Karisto Oy, Hämeenlinna.

Rantanen, E., Harju, M., Norokorpi, L., Uusitalo, J. 2013, Vaara vaanii kaivannossa. Opas kaivannon turvalliseen suorittamiseen, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 9/2013, Liikennevirasto, Helsinki

RATO 2 (2010). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 2, Radan geometria. Liikenneviraston ohjeita 03/2010, Liikennevirasto, Helsinki.

RATO 3 (2014). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3, Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 17/2014, Liikennevirasto, Helsinki.

RIL 201-3-2013 (2013). Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, vesirakenteet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

RIL 254-2016 (2016). Paalutusohje 2016 PO-2016, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

RIL 263-2014 (2014). Kaivanto-ohje, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki

Rosén, L. (2017). Quaternary geology. Luentomoniste kurssista VGE022 Engineering geology, Chalmers University of Technology. Göteborg.

Salmi, T. & Kuula, K. (2012). Rakenteiden mekaniikka, Pressus, Helsinki.

SFS-EN 12699 Execution of special geotechnical works. Displacement piles (2015). Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.

SFS-EN 14199 Execution of special geotechnical works. Micropiles.(2015). Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.

SFS-EN 1536 Execution of special geotechnical works. Bored piles.(1999). Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.

SSAB. (2017). RR- ja RD-paalut suunnittelu- ja asennusohjeet

SSAB. (2015). RD-paaluseinä suunnittelu- ja asennusohjeet

Tirkkonen, E. (2016). Vesitiivis kaivanto porapaaluseinärakenteella, Diplomityö Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere.

Tuikka, J. (2014). Injektoimattoman avoimen tersporapaalun rakennetekninen kantavuus; The structural capacity of the un-injected open profile drilling-pile, Diplomityö.

Uotinen, V. & Jokiniemi, H. (2013). RD Pile wall - a new way to build micropile retaining wall structures.

Uotinen, V. & Rantala, J. (2013). Applications and Development of Modern Steel Pile Technology.

van Breukelen, P. (2016). Redevelopment of Peterhead inner harbours, Teräspaalupäivä 2017, 19.1.2017, Helsinki.

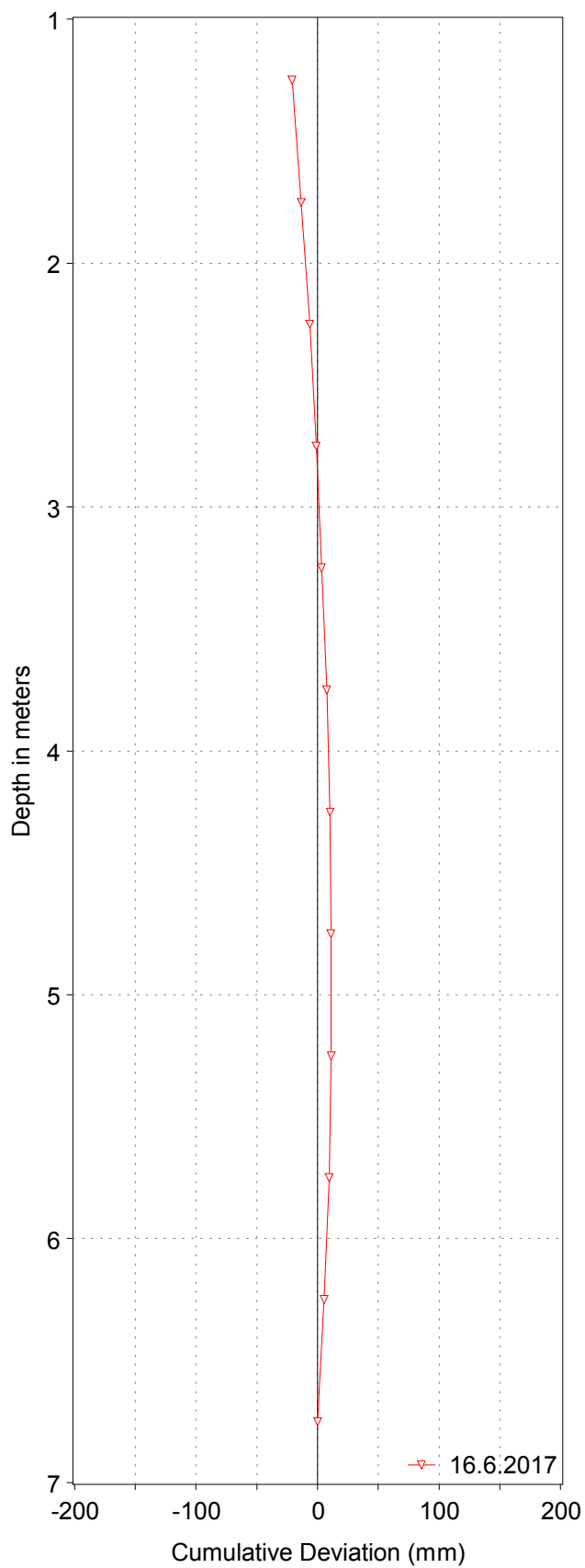
Vianova (2011). Novapoint GeoCalc Supported Excavation Theory. Versio 2.2. 25.3.2011. Vianova Systems Finland Oy.

Viitala, J. (2016). Porapaalutuksen käyttö perustusten vahvistamisessa. Porapaalutuksen työmaatekniikat. Luentomoniste kurssista RAK-23530 Perustusten vahvistaminen, Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

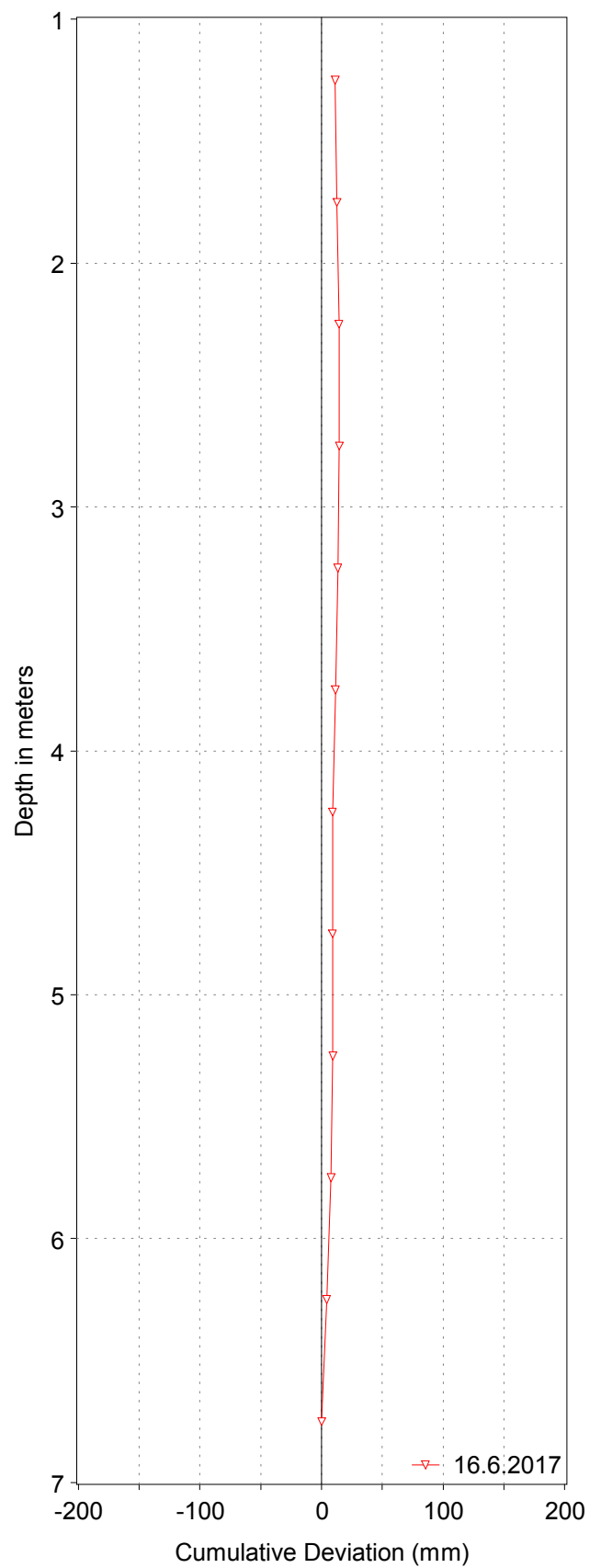
Vunneli, J. (2015). Tripla - Pasilan uusi keskus, Geotekniikan päivä 2015, Helsinki.

Liite 1 (1/3) Porapaaluseinän inklinometrien alkumittaukset

A+ suunta kaivantoon päin



B+ suunta pääradalta poispäin



MITTA OY

Mittaaja: Minna Löytynoja

Robit Bond

Inklinometri 2

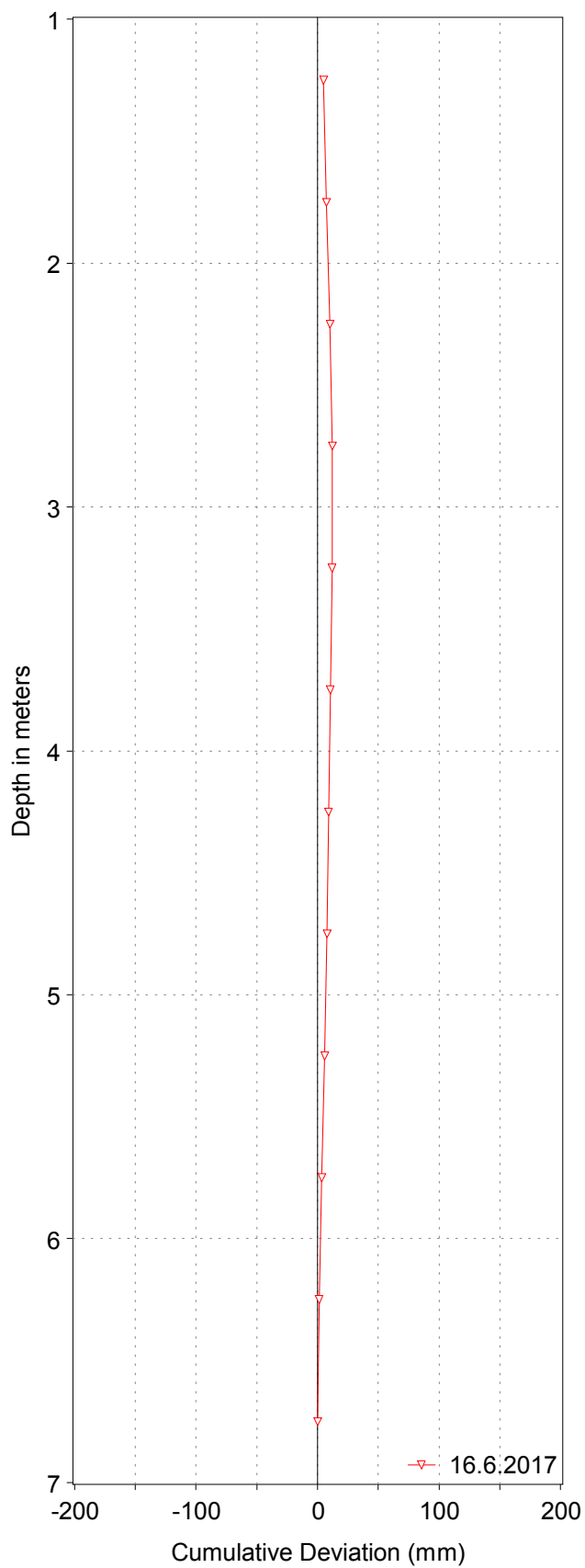
X = 6700967.582

Y = 25506173.008

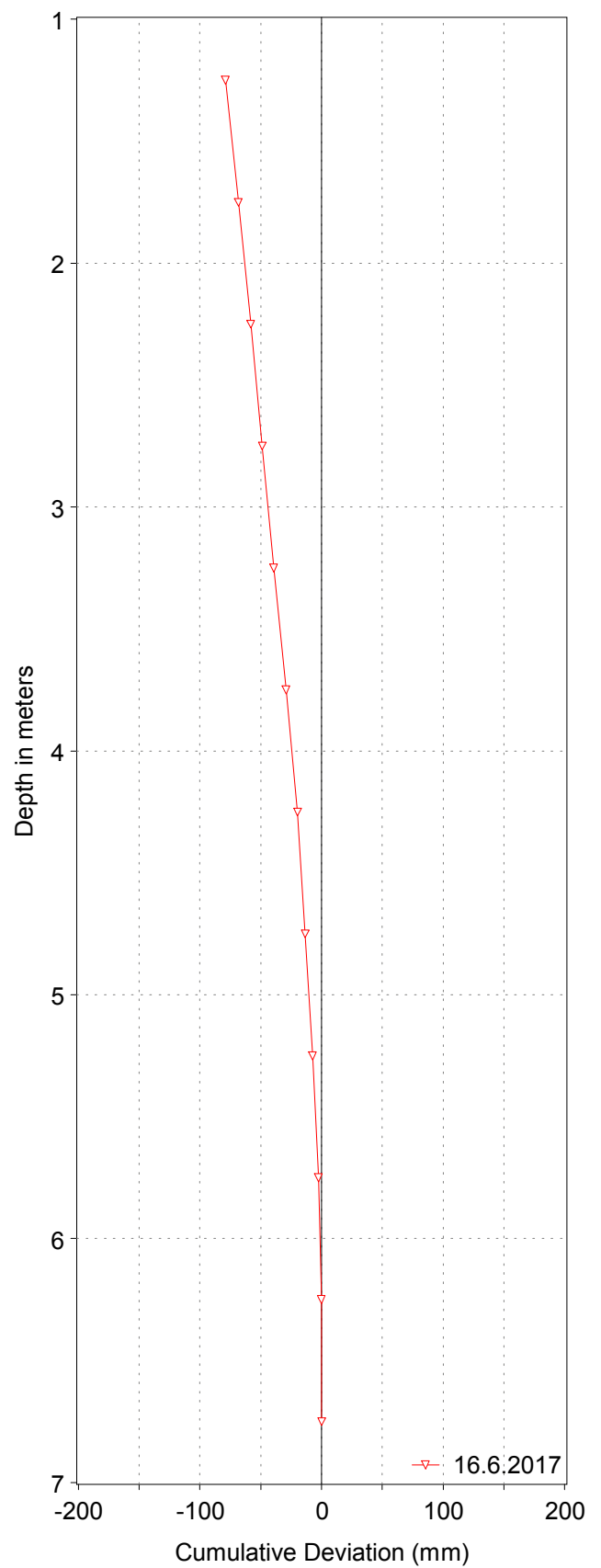
Z = 47.105

Liite 1 (2/3) Porapaaluseinän inklinometrien alkumittaukset

A+ suunta kaivantoon päin



B+ suunta pääradalta poispäin



MITTA OY

Mitaaja: Minna Löytynoja

Robit Bond

Inklinometri 7

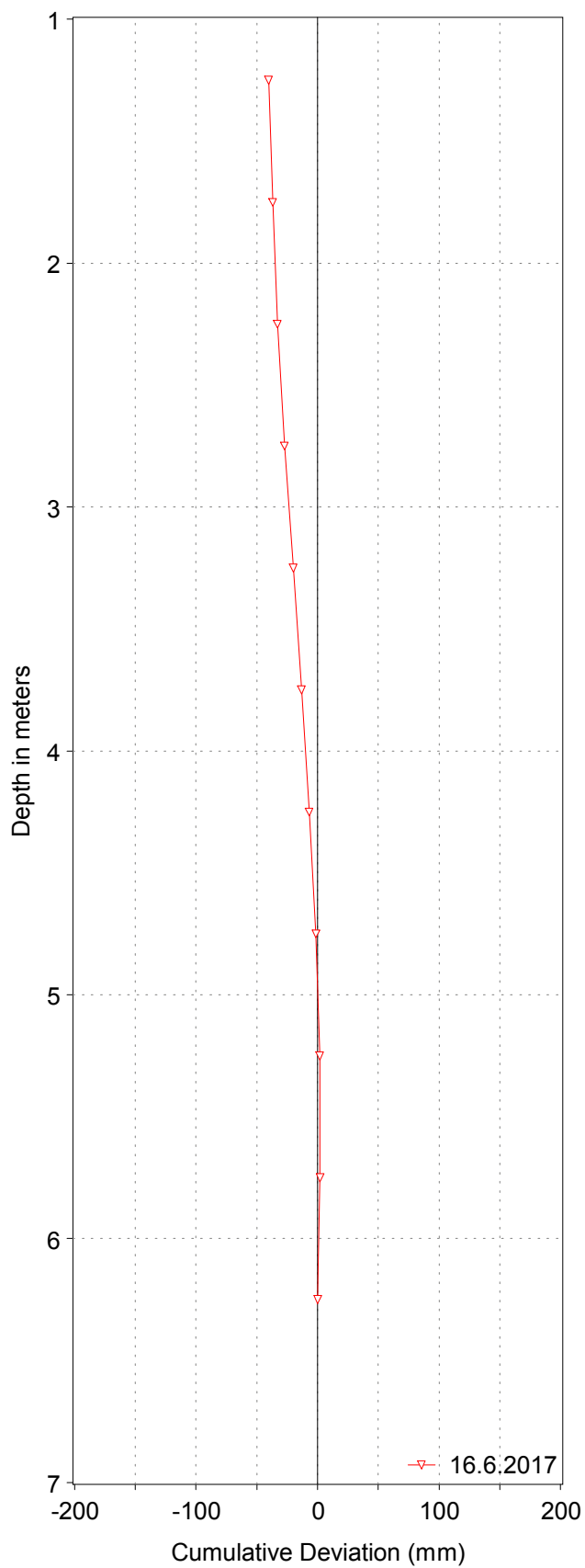
X = 6700967.544

Y = 25506172.115

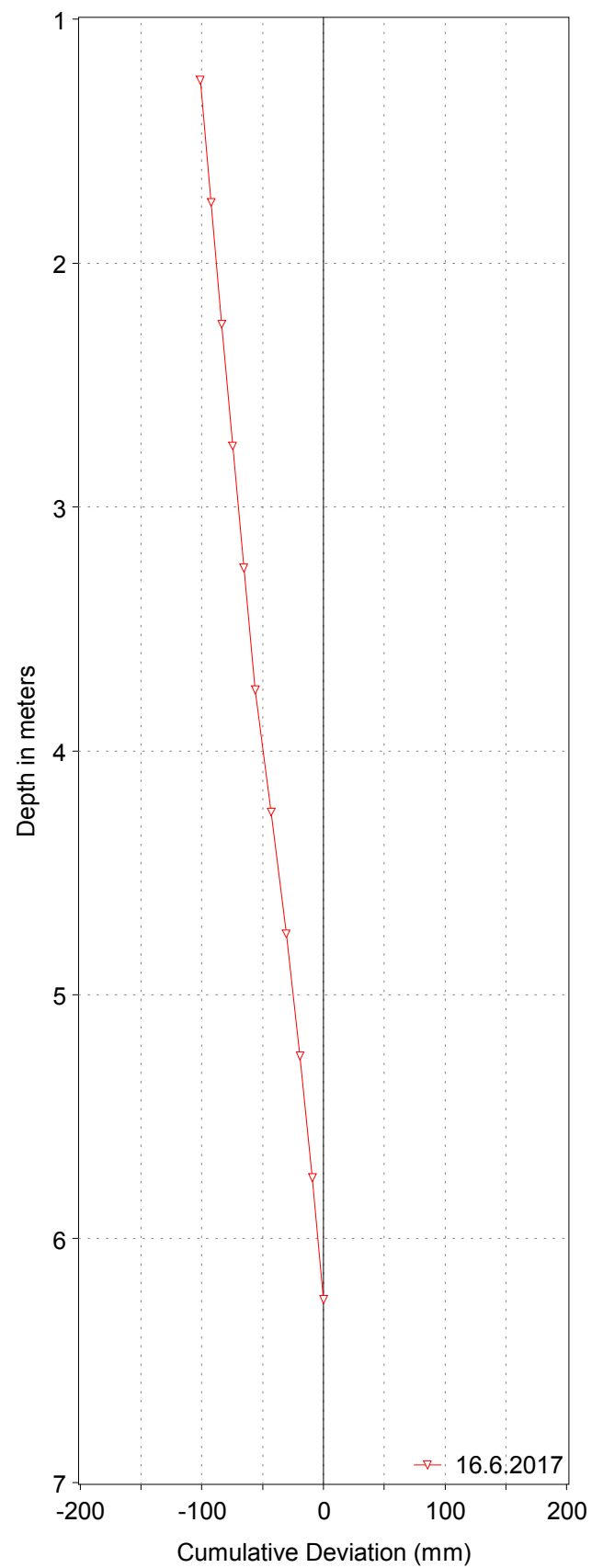
Z = 47.233

Liite 1 (3/3) Porapaaaluseinän inklinometrien alkumittaukset

A+ suunta kaivantoon päin



B+ suunta pääradalta poispäin



MITTA OY

Mittaaja: Minna Löytynoja

Robit Bond

Inklinometri 13

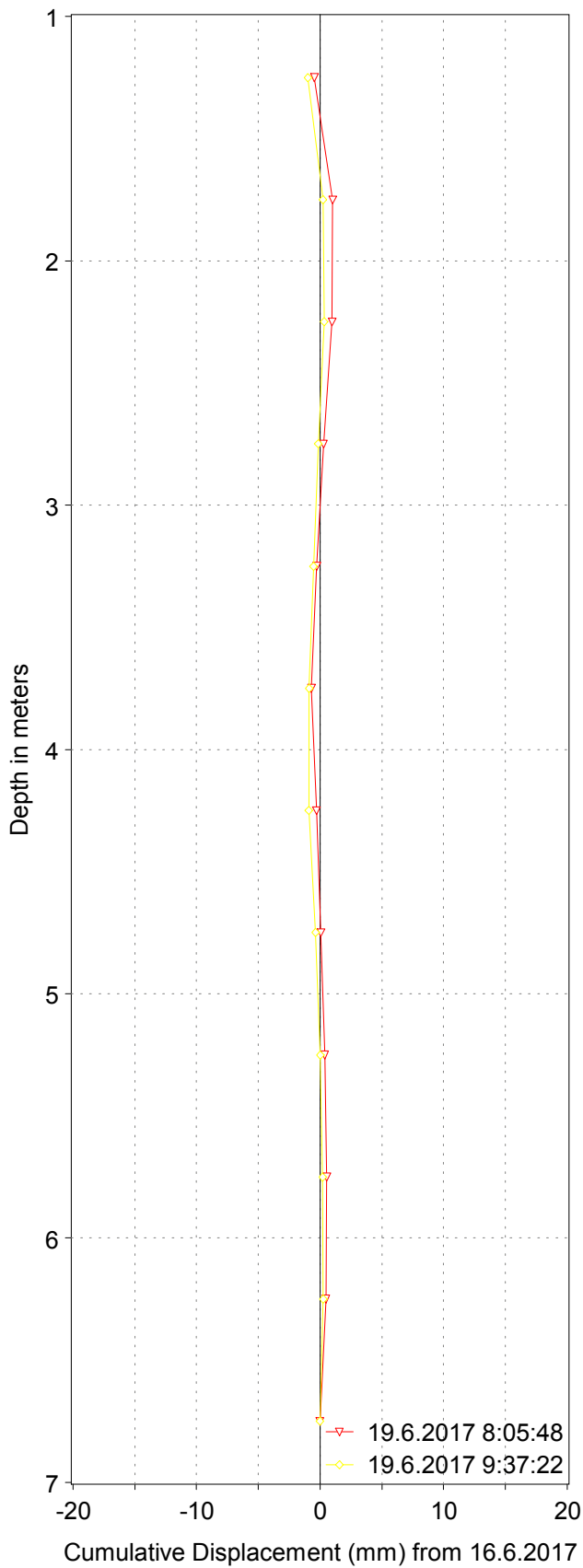
X = 6700967.204

Y = 25506171.182

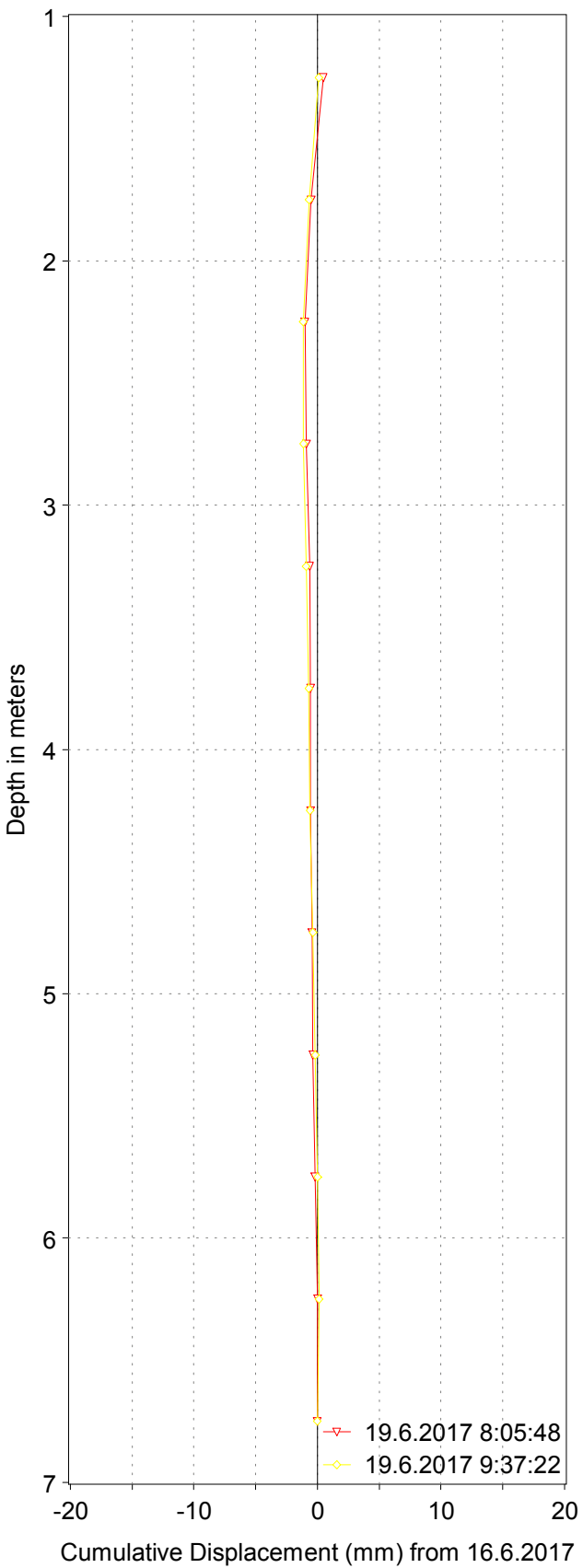
Z = 47.093

Liite 2 (1/3) Porapaaluseinän inklinometrimittaukset kaivun jälkeen

A+ suunta kaivantoon päin



B+ suunta pääradalta poispäin



MITTA OY

Mittaaja: Minna Löytynoja

Robit Bond

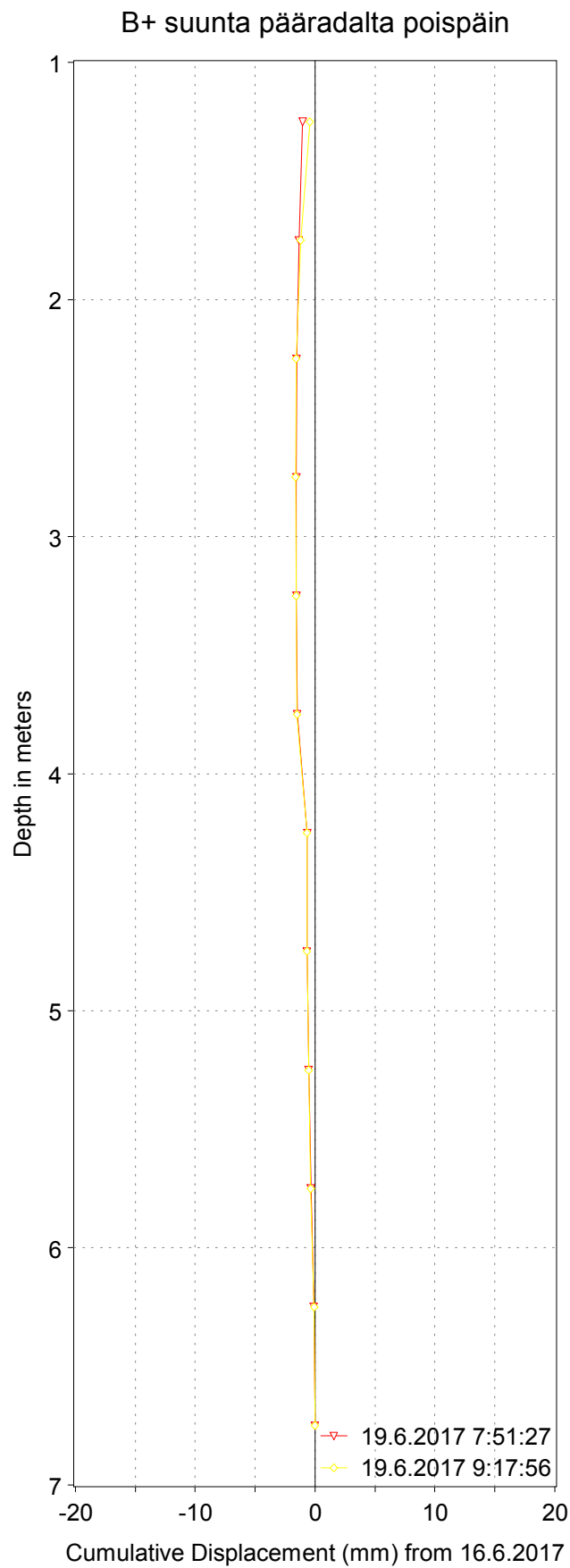
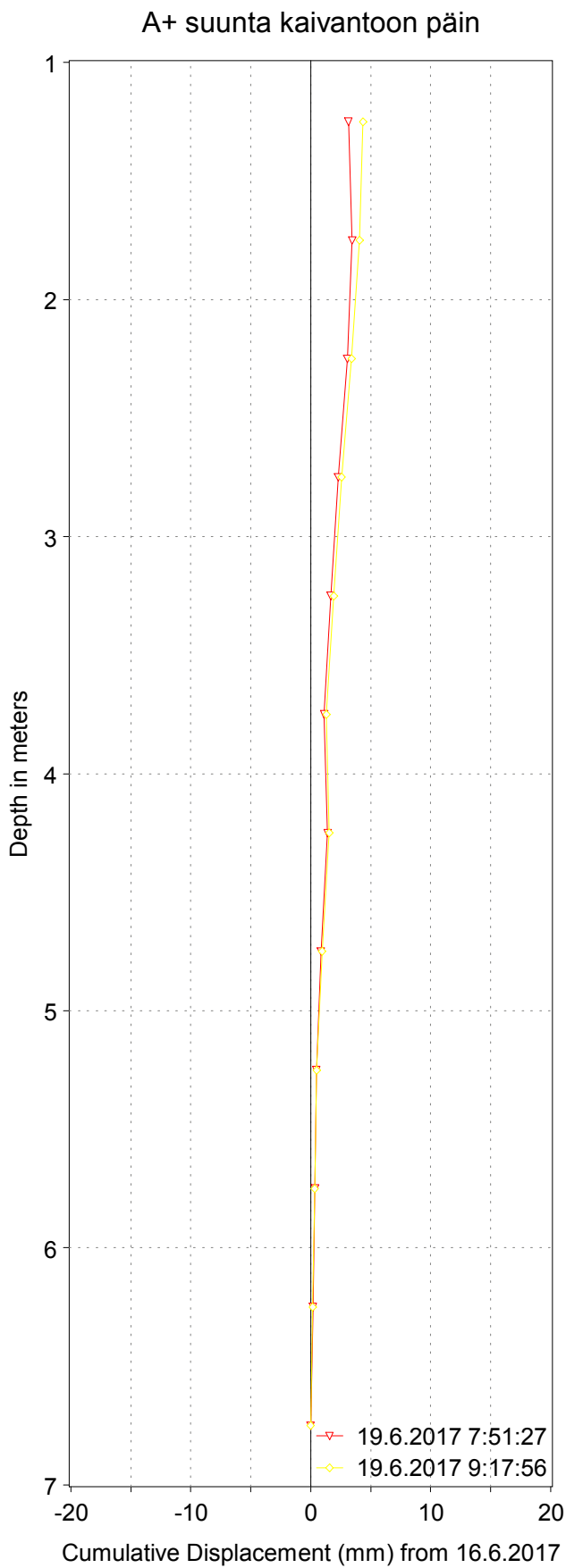
Inklinometri 2

X = 6700967.582

Y = 25506173.008

Z = 47.105

Liite 2 (2/3) Porapaaluseinän inklinometrimittaukset kaivun jälkeen



MITTA OY

Mittaaja: Minna Löytynoja

Robit Bond

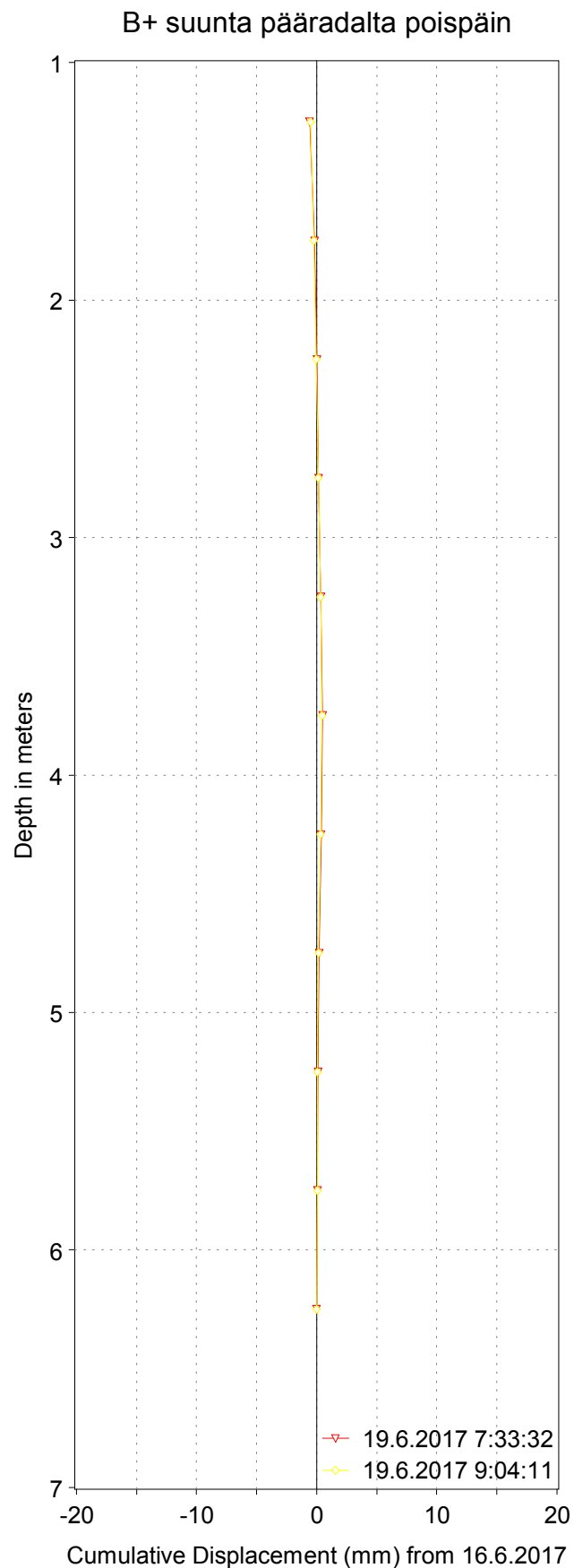
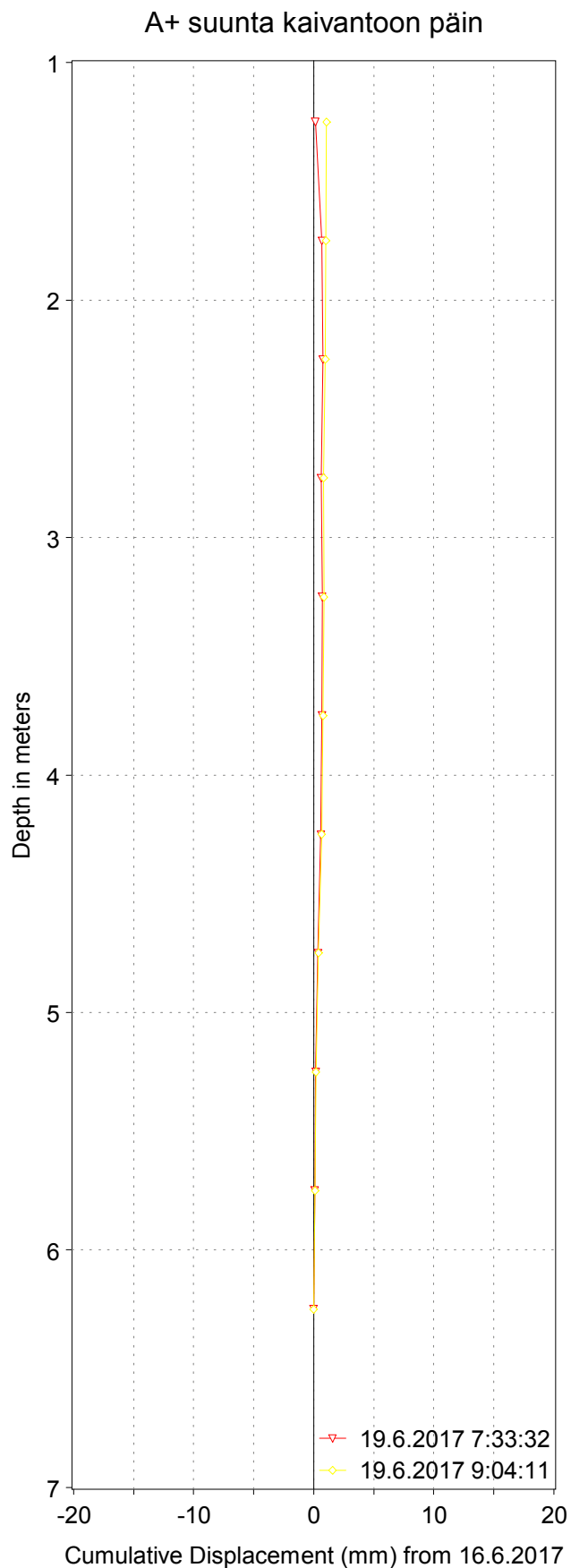
Inklinometri 7

X = 6700967.544

Y = 25506172.115

Z = 47.233

Liite 2 (3/3) Porapaaluseinän inklinometrimittaukset kaivun jälkeen



MITTA OY

Mittaaja: Minna Löytynoja

Robit Bond

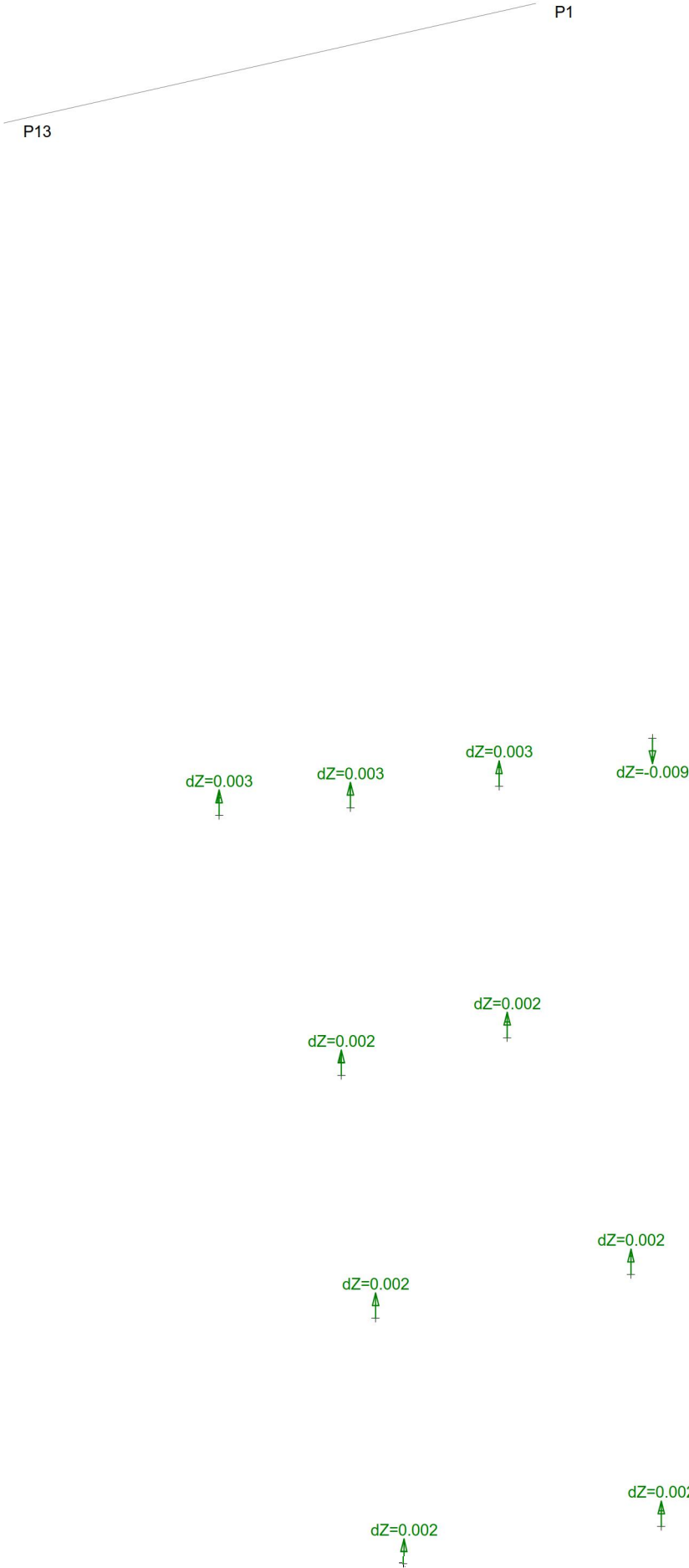
Inklinometri 13

X = 6700967.204

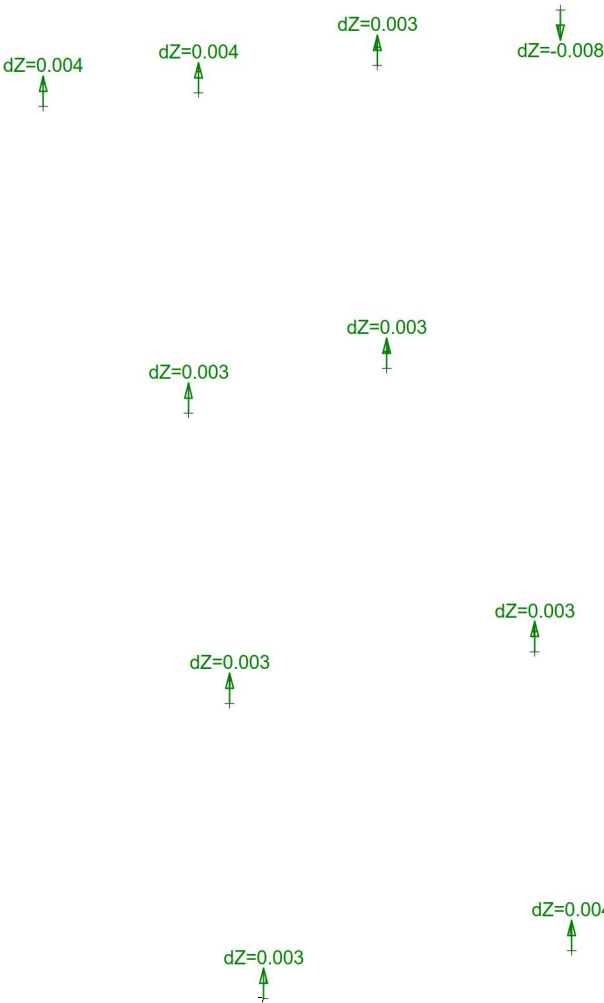
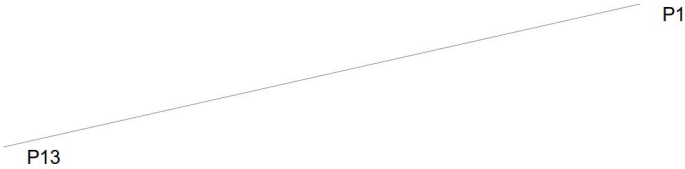
Y = 25506171.182

Z = 47.093

Liite 3 (1/1) Porapaaluseinän pystysiirtymämittaus seinän asennuksen jälkeen

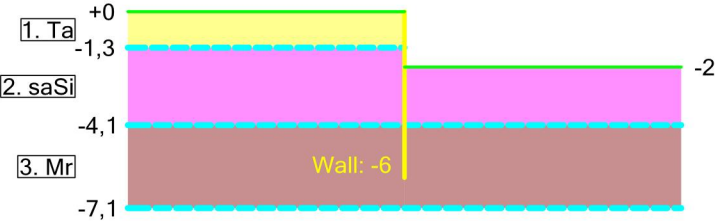


Liite 3 (1/1) Porapaaluseinän pystysiirtymämittaus kaivun jälkeen



Liite 4 (1/1) Keravan koeasennus, siirtymämallinnus

Result	Value
Max. bending moment [kNm]	-10,5
Max. horizontal displacement [mm]	11,5



Wall Type	BoredpileWall
Name	Bond
Manufacturer	Robit
Cross Section Area [m^2]	0,02847088
Calculation Width [m]	1
Inertia Modulus [m^4]	3,55E-05
Section Modulus [m^3]	0,0005033555
Elastic Modulus [kPa]	210000000
Flexural Stiffness [kNm^2]	7455
Axial Stiffness [kNm^2/m^2]	5978884,8
Length of Wall [m]	6

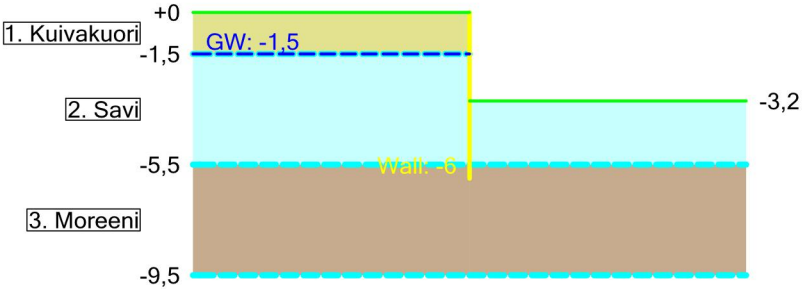
Id	Layer Name	z [m]	h [m]	γ [kN/m³]	Φ [°]	c [kPa]	Δc [kPa/m]	Ko Model	Ko	Earth Pres. Model	Ka	Kp	d/ud	Material Model	δya	δyp	ξ50a	ξ50p	m	n	k
1.	Ta	0	1,3	18	32	0	0	Jaky	0,47	Coulomb	0,28	5,77	Drained	MCM					1000	0,5	1
2.	saSi	-1,3	2,8	16	20	10	0	Jaky	0,66	Coulomb	0,44	2,64	Drained	MCM					250	0	1
3.	Mr	-4,1	3	19	34	0	0	Jaky	0,44	Coulomb	0,25	6,77	Drained	MCM					2000	0,5	1

Diplomityö/Keravan koeasennus

/

Liite 5 (1/2) Naantalin koeasennus, siirtymämallinnus, 6 m paalu

Result	Value
Max. bending moment [kNm]	-23,2
Max. horizontal displacement [mm]	38,7



Wall Type	BoredpileWall
Name	Bond - 1
Manufacturer	Robit
Cross Section Area [m^2]	0,054803
Calculation Width [m]	1
Inertia Modulus [m^4]	3,55E-05
Section Modulus [m^3]	0,0005033555
Elastic Modulus [kPa]	210000000
Flexural Stiffness [kNm^2]	7455
Axial Stiffness [kNm^2/m^2]	11508630
Length of Wall [m]	6

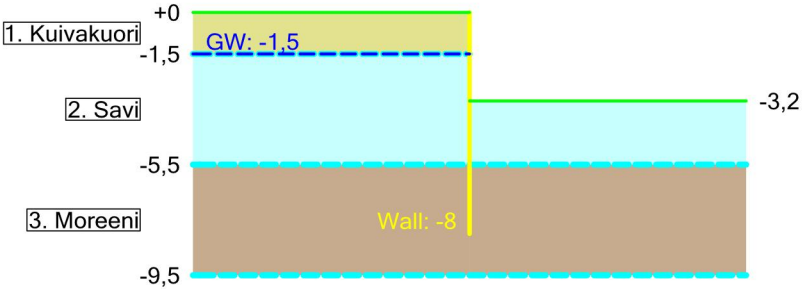
Id	Layer Name	z [m]	h [m]	γ [kN/m³]	Φ [°]	c [kPa]	Δc [kPa/m]	Ko Model	Ko	Earth Pres. Model	Ka	Kp	d/ud	Material Model	δya	δyp	ξ50a	ξ50p	m	n	k
1.	Kuivakuori	0	1,5	16	0	60	0	Jaky	1	Coulomb	1	1	Drained	MCM					200	0,5	1
2.	Savi	-1,5	4	15	20	8	0	Jaky	0,66	Coulomb	0,44	2,64	Drained	MCM					200	0	1
3.	Moreeni	-5,5	4	19	35	0	0	Jaky	0,43	Coulomb	0,24	7,36	Drained	MCM					2000	0,5	1

Diplomityö/Naantalin koeasennus

Naantali, 6 m paalu
/

Liite 5 (2/2) Naantalin koeasennus, siirtymämallinnus, 8 m paalu

Result	Value
Max. bending moment [kNm]	-16,8
Max. horizontal displacement [mm]	26,6



Wall Type	BoredpileWall
Name	Bond - 1
Manufacturer	Robit
Cross Section Area [m^2]	0,054803
Calculation Width [m]	1
Inertia Modulus [m^4]	3,55E-05
Section Modulus [m^3]	0,0005033555
Elastic Modulus [kPa]	210000000
Flexural Stiffness [kNm^2]	7455
Axial Stiffness [kNm^2/m^2]	11508630
Length of Wall [m]	8

Id	Layer Name	z [m]	h [m]	γ [kN/m³]	Φ [°]	c [kPa]	Δc [kPa/m]	Ko Model	Ko	Earth Pres. Model	Ka	Kp	d/ud	Material Model	δya	δyp	ξ50a	ξ50p	m	n	k
1.	Kuivakuori	0	1,5	16	0	60	0	Jaky	1	Coulomb	1	1	Drained	MCM					200	0,5	1
2.	Savi	-1,5	4	15	20	8	0	Jaky	0,66	Coulomb	0,44	2,64	Drained	MCM					200	0	1
3.	Moreeni	-5,5	4	19	35	0	0	Jaky	0,43	Coulomb	0,24	7,36	Drained	MCM					2000	0,5	1

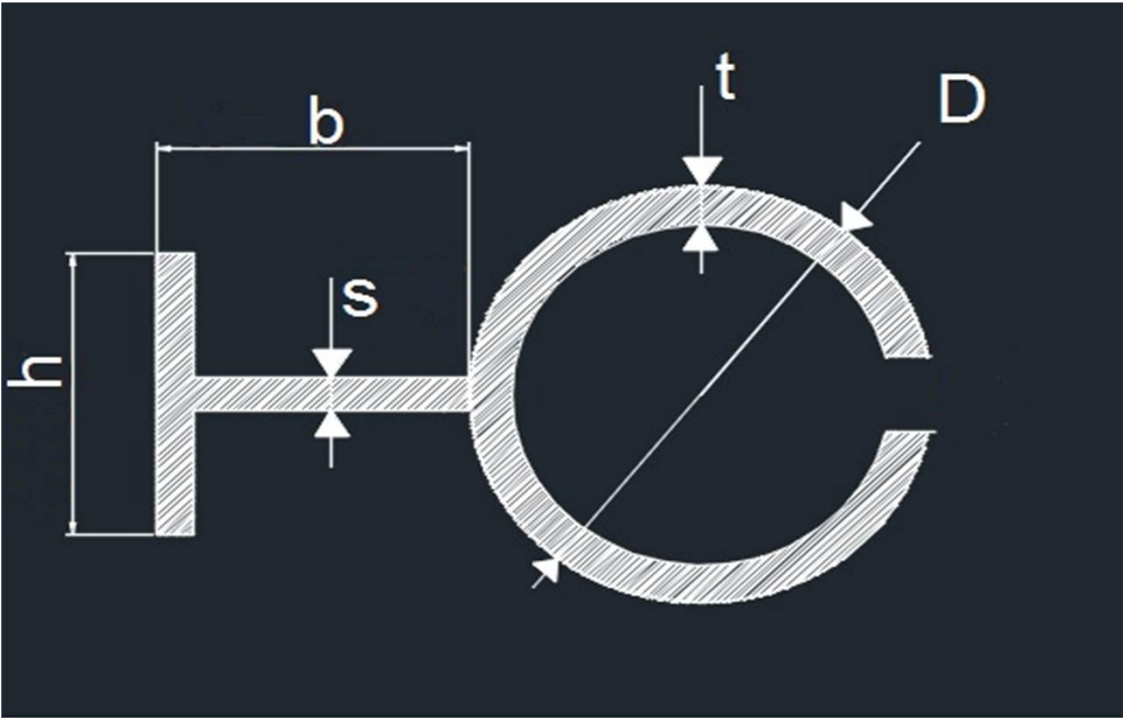
Diplomityö/Naantalin koeasennus

Naantali, 8 m paalu

/

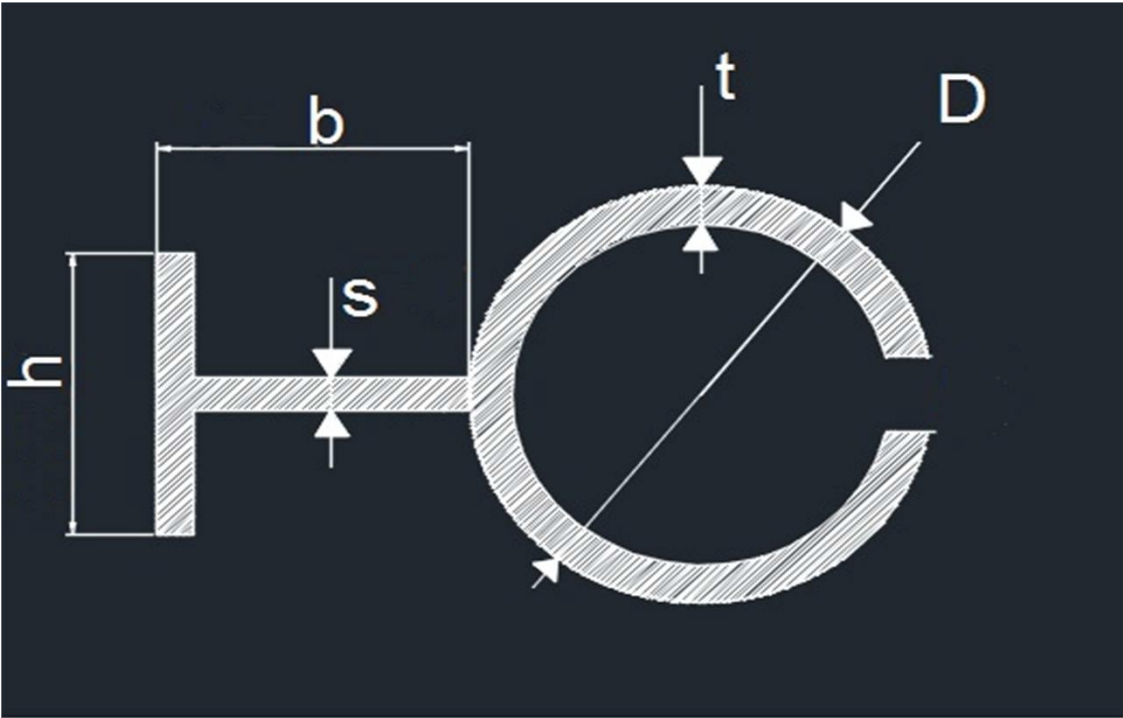
GeoCalc 3.2 (12.02.2018 18:01)

Liite 6 (1/2) Paalujen jäykkyyssparametrien laskenta, Kerava



b		mm
h		mm
s		mm
t		mm
D		mm
x		mm

I_{z1}	126000 mm ⁴
I_{z2}	1514,9167 mm ⁴
I_{z3}	18696290 mm ⁴
I_{z4}	-11493402 mm ⁴
I_{z5}	-9216 mm ⁴
I_z	7321186,5 mm ⁴
W_z	104812,98 mm ³
metrille W_z	440214,51 mm ³ /m
metrille I_z	29284746 mm ⁴ /m



b		mm
h		mm
s		mm
t		mm
D		mm
x		mm

I_{z1}	228666,67 mm ⁴
I_{z2}	2133,3333 mm ⁴
I_{z3}	18696290 mm ⁴
I_{z4}	-13053693 mm ⁴
I_{z5}	-13500 mm ⁴
I_z	5859896,8 mm ⁴
W_z	83892,581 mm ³
metrille Wz	352348,84 mm3/m
metrille Iz	23439587 mm4/m